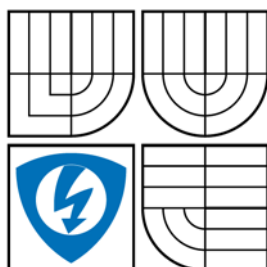


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS**

## **OPTICKÉ POJÍTKO**

OPTICAL CONNECTION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. JAROSLAV HORÁK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. LADISLAV KÁŇA**

BRNO 2009

## ABSTRAKT

Diplomová práce pojednává o návrhu optického pojítka. Cílem práce byla také jeho praktická realizace a úspěšné odzkoušení. Přenosový signál je nízkofrekvenční v rozsahu 20 až 15 kHz a uvažovaná délka spoje je přibližně 200 m. Nejprve je v práci proveden teoretický rozbor problematiky. Pak je popsán návrh a samotná realizace zařízení. V závěru je provedeno měření a zhodnocení parametrů.

Spojení jsem řešil pomocí laserového paprsku, který je modulován kmitočtovou modulací. Tento optický signál je převeden na přijímači pomocí fotodiody typu PIN zpět na elektrický signál. Poté dojde k jeho demodulaci a zesílení. Jako frekvenční modulátor a demodulátor jsem použil smyčku fázového závěsu. Tu realizuje obvod typu CMOS 4046. Výsledkem práce je správně fungující zkonstruované zařízení. Slouží pro přenos řečového a zvukového linkového signálu. Vykazuje dobré vlastnosti, které splňují zadání. Spojení je možné použít i ve venkovním prostředí díky použití krytu. Případný dosah komunikace může být i vyšší než 200 m.

**Klíčová slova:** Optické pojítko, frekvenční modulace, laser, fotodioda, smyčka fázového závěsu.

## **ABSTRACT**

Master's thesis treat of optical connection. The aim of this work was also the practical implementation and successful testing. Communications signal is low frequency in the range of 20 to 15 kHz and intended length of the coupling is approximately 200 m. The first is the work carried out theoretical analysis issues. Then is described the design and implementation of its own facility. In conclusion, the measurement is done and evaluate the parameters.

I have dealt the optical connection with using a laser beam that is modulated frequency modulation. This optical signal is converted in the receiver using a PIN photodiode (type PIN) back to the electrical signal. Then there is the demodulation and amplification. The frequency modulator and demodulator is phase lock loop. It realizes the type of circuit CMOS 4046. The work is designed properly functioning equipment. It serves for the transmission of speech and audio signal line. It has good properties that match the criteria. The connection can be used outdoors due to the use of cover. The scope of communication may be even greater than 200 meters

Keywords: Optical link, frequency modulation, laser, photodiode, the hinge loop phase.

HORÁK, J. *Optické pojítka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 94s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ladislav Káňa.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Optické pojítka“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26.5.2009

.....

podpis autora

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Ladislavu Káňovi, dále Miroslavu Dítěti za konzultace a cenné rady při tvorbě práce a Tomáši Trtkovi za obstarání optických čoček.

V Brně dne 26.5. 2009

.....  
(podpis autora)

# OBSAH

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 ÚVOD.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>2 BEZDRÁTOVÁ OPTICKÁ KOMUNIKACE.....</b>                         | <b>12</b> |
| 2.1 Historie.....   | 12        |
| 2.2 Atmosférický optický spoj AOS.....                              | 12        |
| 2.3 Skladba optického bezdrátového spoje.....                       | 16        |
| 2.4 Základní pojmy a vztahy pro šíření paprsku.....                 | 17        |
| <b>3 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ.....</b>                      | <b>19</b> |
| 3.1 Extinkce .....  | 19        |
| 3.2 Turbulence .....  | 21        |
| 3.3 Výkonová bilance spoje.....                                     | 23        |
| <b>4 TEORIE SVĚTLA .....</b>  | <b>28</b> |
| 4.1 Dualita částice a vlnění .....                                  | 28        |
| 4.2 Typy světelného záření, jeho barva a spektrum.....              | 29        |
| 4.3 Šíření světla a některé světelné jevy .....                     | 30        |
| <b>5 ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ .....</b>                             | <b>32</b> |
| 5.1 Luminiscenční diody (Light Emitting Diodes – LEDs).....         | 32        |
| 5.1.1 Princip činnosti .....  | 33        |
| 5.1.2 Charakteristika a vlastnosti LED .....                        | 33        |
| 5.1.3 Typy LED .....  | 34        |
| 5.2 Laserové diody (LD).....  | 36        |
| 5.2.1 Princip činnosti .....  | 36        |
| 5.2.2 Charakteristika laserových diod .....                         | 37        |
| 5.2.3 Vlastnosti laserových diod.....                               | 37        |
| 5.2.4 Typy laserových diod .....                                    | 39        |
| 5.3 Srovnání optických zdrojů z hlediska bezdrátové komunikace..... | 40        |
| <b>6 FOTODETEKTORY .....</b>  | <b>43</b> |
| 6.1 Vlastnosti fotodetektorů.....                                   | 43        |
| 6.2 Typy fotodetektorů .....  | 44        |
| 6.2.1 Fotodioda PIN.....  | 44        |
| 6.2.2 Lavinová fotodioda APD.....                                   | 45        |
| <b>7 NÁVRH OPTICKÉHO POJÍTKA.....</b>                               | <b>47</b> |
| 7.1 Výběr řešení.....   | 47        |
| 7.1.1 Modulace vstupního signálu .....                              | 48        |
| 7.2 Integrovaný obvod HCF4046BE .....                               | 49        |
| 7.3 Popis zapojení vysílací a přijímací části .....                 | 53        |
| 7.3.1 Popis obvodu vysílače .....                                   | 53        |

---

|   |           |
|---|-----------|
| 7.3.2 Popis obvodu přijímače .....                        | 56        |
| 7.4 Laserový modul .....                                  | 58        |
| 7.5 Optická přijímací čočka .....                         | 59        |
| 7.6 Fotodetektor .....                                    | 60        |
| <b>8 REALIZACE PROJEKTU .....</b>                         | <b>62</b> |
| 8.1 VÝROBA DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ .....                     | 62        |
| 8.2 SESTAVENÍ MECHANICKÉ ČÁSTI POJÍTKA .....              | 63        |
| 8.3 POČÁTEČNÍ NASTAVENÍ A ZAMĚŘENÍ.....                   | 65        |
| <b>9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....</b>                             | <b>67</b> |
| 9.1 Měření na vysílači.....                               | 67        |
| 9.2 Měření na přijímači.....                              | 71        |
| <b>10 ZÁVĚR.....</b>                                      | <b>77</b> |
| <b>11 POUŽITÁ LITERATURA .....</b>                        | <b>80</b> |
| <b>PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ .....</b> | <b>82</b> |
| <b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                                 | <b>84</b> |
| <b>PŘÍLOHY .....</b>                                      | <b>85</b> |



# 1 ÚVOD

Neustále dochází k rozvoji komunikačních technologií pro přenos informací. V případě, že není vhodné nebo možné použít běžná kabelová či rádiová spojení, ať už z důvodu topologického nebo finančního, je možnost využít optických atmosférických (bez kabelových) spojů (AOS). Pojem optické pojítka je zařízení umožňující přenos informace mezi svým vysílačem a přijímačem přes atmosféru. Přenosovým médiem je zde optická nosná vlna optického zdroje světla. Nejčastěji se jako zdroj světelného paprsku ve vysílači používá laserová dioda, infračervená (IR) nebo vysoce svítivá luminiscenční dioda LED. V různé literatuře se můžeme spíše setkat se spoustou jiných označení pro tyto systémy nebo spoje, např. „bez kabelový optický spoj“, „optické pojítka“, v anglicky psaných publikacích např. „free-space optical links (FSO)“, „optical through the air communication“, „optical wireless communication“ apod. Využití těchto systémů je především v aplikacích, kde by použití klasického optického nebo metalického kabelu bylo nemožné z důvodu finančního nebo topologického.

Úkolem mé diplomové práce je vytvoření koncepce akustického pojítka. Cílem je tedy navržení a zkonstruování tohoto zařízení, které by mělo být schopno komunikovat opticky a bezdrátově na vzdálenost přibližně 200 m. Pojítka má sloužit k přenosu nízkofrekvenčního (audio) monofonního signálu v rozsahu 20 Hz až 15 kHz a mělo by být schopno pracovat i ve venkovním prostředí. Dalo by se tedy nazvat i „akustickým optickým pojítkem“. Dalším požadavkem je zajištění duplexního provozu mezi komunikujícími stranami. Obě strany tak mezi sebou mohou komunikovat pomocí mikrofону, nebo si posílat elektrický signál linkové úrovně reprezentující zvuk.

Práce se nejdříve zabývá teoretickým rozбором a stavem dané problematiky. Popisuje přenos světelného paprsku a vlastní přenosové prostředí. Dále jsou rozebrány vlastnosti a porovnání výhod a nevýhod jednotlivých přenosových médií, z nichž je v této aplikaci použit laserový paprsek. Práce především popisuje samotný návrh, zkonstruování, oživení a následné změření některých parametrů optického pojítka. Popisuje také zaměřování mezi komunikujícími stranami. Závěrem jsou shrnuty důležité parametry optického pojítka a popsán výsledek řešení diplomové práce.

## 2 BEZDRÁTOVÁ OPTICKÁ KOMUNIKACE

### 2.1 Historie

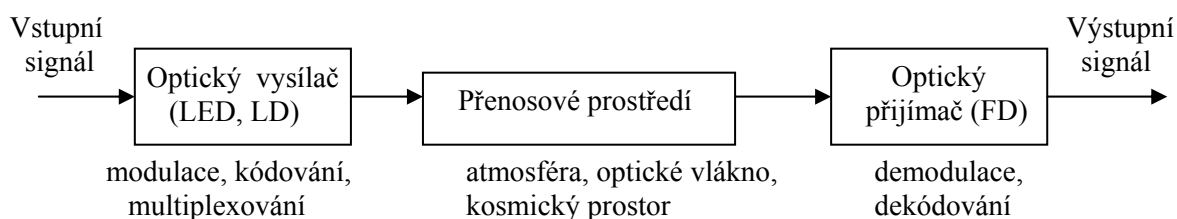
Komunikace využívající světelných paprsků není nikterak nová technologie. Již staří Římané používali naleštěné kovové pláty jako zrcadla ke signalizaci na velkou vzdálenost. Americká armáda používala počátkem 19. století podobné, světlo využívající, zařízení k přenosu telegrafních informací mezi vrcholky hor. V námořnictví se blikající světlo používalo mezi jednotlivými loděmi k přenosu zpráv nebo jako varovná a orientační signalizace v případě majáku. V roce 1880 Graham Bell přišel s vlastním vynálezem „photophone“. Tento patent byl založen na rozechvění zrcadla hlasem a přenášení světelného paprsku od něj odraženého. Zrcadlo bylo nastaveno tak, aby na něj dopadalo běžné sluneční světlo. Na přijímači bylo toto modulované světlo absorbováno černou bavlnou, což způsobovalo změnu objemu bavlny a tento jev vyvolával zvukové vlny. Jednalo se o první zařízení, o kterém se dá hovořit jako o atmosférickém optickém spoji [2], [3].

Velký rozvoj optické komunikace odstartoval vynález laseru roku 1960 Theodorem Haroldem Maimanem. Nejprve se soustředil vývoj na komunikaci mezi satelity. V letech 1961 a 1962 se objevují první laserové diody (Prochorov, Basov) a fotodiody. Vývoj těchto prvků zahájil využívání komunikace ve volném prostoru na Zemi i ve vesmíru a v optických vláknech. Od této doby se tyto optické zařízení používají v běžných aplikacích, telefonních zařízeních a počítačových sítích. Vojenské obranné výzkumné programy mohou způsobit zásadní průlom v dálkové optické komunikaci. Již se například s úspěchem využívá optických spojů mezi orbitálními družicemi a základnovými stanicemi i mezi satelity s velmi vzdáleným rozsahem. První publikace o atmosférickém optickém spoji se objevují počátkem 90. let 20. století. S výrazným poklesem cen hlavních komponent těchto systémů dochází k jejich rozsáhlému komerčnímu využití [2], [3].

### 2.2 Atmosférický optický spoj AOS

**Atmosférický optický spoj (AOS)** je komunikační technologie, která pomocí

přenosu optických svazků zajišťuje přenos signálu atmosférou. AOS zpracovává informace prostřednictvím optické nosné vlny, která se může energeticky nebo vlnovými délkami dělit do více kanálů. Tvoří jej tři základní prvky: optický vysílač, optický přijímač a přenosové prostředí [1].



**Obr. 2.1:** Základní blokové schéma optického komunikačního systému

Ve vysílači se přijatý vstupní elektrický signál moduluje, případně kóduje a multiplexuje a takto upravený se posílá na převodník elektrického signálu na optický (žárovka, LED, laser). Dále je optický signál navázán do přenosového prostředí, ze kterého je přiveden do bloku přijímače. Tam se provede opět inverzní přeměna signálu optického na elektrický. Nejprve je nutné přenesený signál zesílit a dále se tento signál demoduluje, případně dekóduje a demultiplexuje. Základní používaná kódování jsou linkové (NRZ, RZ, CMI, HDB3) a transportní (EF3, NRZ, 5B6B, Manchester) [1].

Přenosové systémy můžeme rozdělovat [1]:

- podle zpracování signálu: analogové a digitální.
- podle požadované náročnosti zajišťované služby: úzkopásmové, širokopásmové.
- podle způsobu modulace: s intenzitní modulací, s modulací pole (koherentní).
- systémy s modulací pole: s amplitudovou, kmitočtovou a fázovou modulací.

V optických vysílačích jsou nejčastěji používány zdroje světla o vlnových délkách 850 nm a 1550 nm. Je to dáno atmosférickými podmínkami při přenosu (obr. 3.1), dostupností těchto zdrojů a zajištění bezpečnosti pro oči. Většinou se přenáší signál s digitální intenzitní modulací, není to ale pravidlem. Pro aplikace nevyžadující vysoké přenosové rychlosti a nízkou chybovost stačí využít jen např. AM, FM nebo PM. AOS není omezen jen na využití v atmosféře, ale může být využíván i v uzavřených místnostech, velkých halách nebo kosmickém prostoru [1].

Výhody a nevýhody AOS [4]:

- Vysoká odolnost proti odposlouchávání a rušení. Narušitel by musel přímo vstoupit do svazku, což se dá lehce zjistit.
- Vysoká přenosová rychlost.
- Nedochozí k zahlcování atmosféry elektromagnetickými vlnami na rádiových kmitočtech.
- Vysílače jsou konstruovány podle hygienických norem, ani při pohledu do vysílače nedojde k poškození zraku.
- Z hlediska šířky pásma potenciál odpovídá možnostem optických vláknových spojů.
- Možnost užití režimu jednofotonového přenosu s technikou distribuce kvantových stavů fotonů. Tento přenos umožňuje využití kryptografie s vysokým zabezpečením utajovaných zpráv.
- Užívání zařízení pro přenos signálu přes atmosféru není omezeno žádnými licencemi.
- Závislost funkčnosti a kvality spoje na podmínkách přenosového prostředí (počasí).
- Nutnost zajistit přímou viditelnost mezi vysílačem a přijímačem.
- Zajištění, aby na fotodetektor nedopadlo silnější soustředěné sluneční záření. Mohlo by dojít až k poškození.

**Důvody používání a využití technologie v praxi**

Existuje spousta aplikací pro využití AOS, které mohou splnit podmínku přímé viditelnosti a kratší vzdálenosti mezi vysílačem a přijímačem optického signálu. Na rozdíl od přenosu informace přes optická vlákna není v případě využití AOS nutné provádět výkop a ukládání vláken do země, není třeba konstruovat optickou síť se zesilovači signálu, přepínači atd. Další výhodou je, že odpadají problémy s vyřizováním povolení od vlastníků půdy při případné pokládce kabelů. Tak jako u přenosu optickými vlákny umožňují dosáhnout velkých přenosových kapacit i využívat multiplexování. Dosah může činit až desítky kilometrů, čili může sloužit i k vybudování WAN [2].

Rádiové spojení se stalo velmi významné v moderní bezdrátové komunikaci. V atmosféře se ale přenosové vlny o stejných vlnových délkách navzájem ruší a umožnění vysílat na jednotlivých vlnových délkách je řízeno a kontrolováno

pověřenými úřady. Jednotlivá kmitočtová pásma jsou využívány pro rozhlasové a televizní vysílání, armádní účely, telefonní komunikace, wifi sítě ad. Postupně tak docházelo k zahlcení přenosového prostředí a dnes se mluví již o elektromagnetickém smogu. Zbývá tedy malá část volného kmitočtového spektra pro komerční využití a také z tohoto důvodu se rozrostl zájem o technologie AOS a jejich využití v praxi [2].

AOS umožňují široké spektrum využití a tato technologie je nadále na vzestupu. V budoucnu se dá očekávat její další rozvoj. Nejčastější využití je u propojení počítačových sítí. Jinak se běžně využívá např. u dálkového ovládání, bezdrátových sluchátek, měření vzdáleností atd. Ve vesmírném prostoru je AOS dobrou volbou pro přenos dat např. mezi vesmírnými sondami. Při jednom pokusu bylo dosaženo přenosu na vzdálenost okolo 30000 km. Také začínají vznikat projekty přenosu dat ve vojenství, bankovníctví a vládních organizacích, kde je kladen důraz na zabezpečení zpráv [2].

V budoucnu se těmto systémům předpovídá prudký rozvoj a široké uplatnění. V průmyslu jde o řízení a monitoring, dále zabezpečení proti vniknutí (alarmy), sledování počasí, datové spojení mezi zařízeními v kancelářích, monitorování pohybu zvířat nebo např. monitorování v medicíně. U aplikací s dlouhým dosahem by se daly AOS využít např. u komunikace mezi sondami, měření vzdáleností ve světelných rocích, vysokorychlostní přenosy dat i s metodou multiplexu, jako optický radar, vzdálené telefonní spoje (levnější než mikrovlnné spoje) atd. Lze očekávat, že systémy budou pracovat ve spektrální oblasti okolo 3  $\mu\text{m}$  a využívat rozptylu optických vln v atmosféře, dále budou používat koherentní metodu přenosu a distribuci kvantových stavů fotonů [2].

### **Omezení technologie a možné řešení problematiky**

Hlavním faktorem ovlivňujícím provozuschopnost AOS je počasí. Hustá mlha, silný déšť nebo sněžení mohou způsobit neprostupnost signálové cesty a způsobit dočasný výpadek spojení. Mlha představuje velký problém pro AOS. Jde o to, že velikost jednotlivých kapiček aerosoly může být rozměrově shodná s vlnovou délkou světla. Řešení může představovat použití jiných vlnových délek nebo většího výkonu. Světelný paprsek některých vlnových délek infračerveného spektra může daleko lépe proniknout špatným počasím než běžné viditelné světlo. U kratších přenosových cest je možné zvýšit vysílací výkon na vysílači k zajištění dostupnosti komunikace. Přesto zatím není u spojení na větší vzdálenosti tento problém vyřešen. Dalším problémem je nutnost zajistit přímou viditelnost u dálkových spojů. Jedním ze způsobů zvýšení

spolehlivosti spojů je využití čistě fotonické technologie. Nedochází tak k převodům elektrické na optickou soustavu a naopak. Přenášení, dělení a zesilování signálu se provádí v jeho optické formě, čímž se zvyšuje spolehlivost a rychlost komunikace. Další možností zvýšení spolehlivosti je možno docílit uspořádáním spojů do polygonálního uspořádání, kde jednotlivé hlavice spojů nejsou vzdáleny více než 500m. Ještě se používá doplnění AOS mikrovlnným záložním spojením (hybridní pojítka) [2].

## **2.3 Skladba optického bezdrátového spoje**

Optický bezdrátový spoj tvoří dvě hlavice, které jsou na sebe přesně zaměřeny a většinou jsou konstruovány pro duplexní přenos informací. Jsou tedy vybaveny vysílacím a přijímacím zařízením. Můžeme rozlišovat spoje analogové a digitální podle druhu přenášeného signálu. Dále podle způsobu přenosu (přenosového média) rozlišujeme spoje s koherentním nebo nekoherentním způsobem přenosu [1].

### **Vysílací systém**

Vysílací systém přijímá vstupní data, která je potřeba přenést, a převádí je na vyzařovaný modulovaný optický svazek přenášený volným prostředím. Tento systém je složen z těchto základních bloků: budič optického zdroje, převážně laserová dioda nebo LED, zaměřovací systém a vysílací optická soustava (VOS).

Prostorové tvarování optického svazku zabezpečuje vysílací optická soustava (např. povrstvený plankonvexní dublet). Provádí se to z důvodu, aby veškerá energie světla nebyla soustředěna v úzkém kuželu světelného paprsku. Rozšířením světelného kuželu VOS dosáhneme lepšího zaměření, menšího vyzařovacího úhlu a větší odolnosti proti zastínění přenosového paprsku malým předmětem a lépe se světelný rozšířený paprsek vyrovnává s atmosférickými rušivými vlivy. Také je to důležité pro zajištění větší bezpečnosti pro případ dopadu světelného paprsku na sítnici oka. Svazek dále prochází optickým průzorem z důvodu zachycení nečistot a ochránění proti venkovním vlivům. Správné nasměrování optického paprsku z vysílače na optiku přijímače má na starost zaměřovací systém, který je ovládaný mechanicky nebo elektronicky. Pro hrubé zaměření většinou slouží dalekohled spojený s hlavicí. Při energetické bilanci se za

původní svazek uvažuje kruhově symetrický gaussův svazek, který má na ose svazku stejnou intenzitu, v kruhové stopě je obsažen stejný výkon jako u původního svazku [1].

### Přijímací systém

Úkolem přijímacího systému je pomocí přijímací optické soustavy (POS), např. Fresnelova čočka, soustředit přijímaný optický paprsek na aktivní plochu fotodetektoru, který převede optický přenášený signál do elektrické podoby, který je možné dále zpracovávat a vyhodnocovat. Tento systém je složen z těchto základních bloků: přijímací optické soustavy, fotodetektoru, předzesilovače a demodulátoru. Systém je ještě vybaven optickým průzorem. Pro nasměrování optického paprsku z vysílače na optiku přijímače má na starost zaměřovací systém stejně jako na vysílací straně. Před fotodetektorem se ještě umísťuje interferenční filtr, správně zvolený vzhledem k vlnové šířce přijímaného paprsku. Minimalizuje tak vliv rušivého záření pozadí [1].

## 2.4 Základní pojmy a vztahy pro šíření paprsku

Uvažujme důležitý případ u AOS, kdy se optické vlny šíří v úzkém svazku podél osy. Paraxiální vlny jsou takové vlny, jejichž normály vlnoploch svírají s touto osou malý úhel. Tyto vlny vyhovují vlnové rovnici [4]

$$\nabla^2 \vec{E}(\vec{r}) + k^2 \vec{E}(\vec{r}) = 0, \quad (2.1)$$

kde  $\vec{E}(\vec{r})$  je komplexní amplituda elektrického pole,  $k$  je vlnové číslo. Pro případ paraxiální vlny je řešením této rovnice vlna, která se nazývá *gaussův svazek*.

Gaussovský svazek má optický výkon soustředěn téměř jen do úzkého kužele a optická intenzita v rovině kolmé na směr šíření vlny je určena kruhově symetrickou gaussovskou funkcí s maximem  $I_0$  na ose šíření svazku. Místo, kde optická intenzita poklesne na hodnotu  $I_0/e^2$  je kraj svazku. Vzdálenost kraje svazku od jeho osy se nazývá *pološířka svazku* a značí se  $w$ . Nejužšímu místu svazku se říká *krček svazku*, kde se pološířka svazku označuje  $w_0$ . Mějme souřadnicovou soustavu  $xyz$ . V počátku této soustavy je průsečík osy šíření, řekněme osy  $z$  s rovinou krčku. Krček svazku leží v rovině  $xy$ . Pološířka se s osou pomalu zvětšuje a její závislost lze vyjádřit vztahem [4]

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.2)$$

kde  $z_0 = \frac{k \cdot w_0^2}{2}$  je *Rayleighova vzdálenost*. V této vzdálenosti  $z_0$  je pološířka svazku [4]

$$w(z_0) = w_0 \sqrt{2} . \quad (2.3)$$

Úhel divergence  $\theta$  popisuje, pod jakým sklonem se světelný svazek rozšiřuje ve směru šíření a platí pro něj [4]

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{2}{k \cdot w_0} . \quad (2.4)$$

Z řešení vlnové rovnice gaussovského svazku lze odvodit vztah optické intenzity [4]

$$I(x, y, z) = I_0 \left[ \frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \cdot e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}} , \quad (2.5)$$

kde  $I_0$  je opt. intenzita na ose šíření v počátku souřadnic. Celkový optický výkon přenášený gaussovským svazkem lze napsat [4]

$$P = \frac{1}{2} \cdot I_0 \cdot \pi \cdot w_0^2 . \quad (2.6)$$

Výkon svazku v příčném řezu kolmém na směr šíření (rovina x,y), kde pološířka svazku  $w$  je poloměr kružnice na řezu, můžeme určit ze vztahu [4]

$$P_w = \int_0^{\rho=w} I(\rho, z) \cdot 2\pi\rho \, d\rho \approx 0,86P , \quad (2.7)$$

kde  $\rho$  je radiální vzdálenost a platí  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

Ze vztahu (2.7) vyplývá, že se svazkem omezeným svým krajem přenáší přibližně 86% celkového vyzářeného výkonu.



### 3 ATMOSFÉRICKÉ PŘENOSOVÉ PROSTŘEDÍ

Atmosférické přenosové prostředí je prostředí nehomogenní a nestacionární a významně ovlivňuje kvalitu přenosu. Způsob ovlivňování má náhodný charakter. Atmosférické jevy způsobují útlum, fluktuaci a dokonce až přerušování výkonu optického svazku. Při vysokém jasu pozadí se snižuje rozsah dynamiky přijímače nebo způsobuje jeho saturaci. V atmosféře se také uplatňuje refrakce, kterou zapříčiňuje různá velikost indexu lomu atmosféry. V případě, kdy se vlnění dostane na rozhraní dvou indexů lomu, změní se jeho fázová rychlost a dochází tak ke změně směru šíření svazku. Prostor pro přenos světelného paprsku se nachází v troposféře, kde dochází ke kondenzaci vodních par, ke sněžení, dešti, vytvářejí se mlhy, bouřky a projevuje se vítr i s jeho turbulencemi. Teplota a tlak atmosféry se mění v prostoru i čase což má za následek nestálost jejího indexu lomu. Jakmile přenášený paprsek prochází takovýmto prostředím, mění svůj tvar i energii. Rozšíření nebo odklon mohou zapříčinit změny úrovně přijímaného optického výkonu [1], [4].

Při šíření svazku dochází k těmto hlavním jevům [1]:

- extinkce optické intenzity vlivem absorpce nebo rozptylu na molekulách nebo aerosolech.
- extinkce a fluktuace optické intenzity vlivem turbulence troposféry
- fluktuace optické intenzity vlivem deště nebo sněhu nebo vlivem deformace tvaru svazku
- krátkodobé přerušování svazku (ptáci, vrtulník aj.)

#### 3.1 Extinkce

**Extinkce** je označení pro zeslabení optické intenzity. Výše zmiňované jevy působí současně a fluktuace zapříčiňuje současně extinkci intenzity. Všechny tyto jevy můžeme zjednodušeně rozdělit na extinkci a fluktuaci optické intenzity a náhodné krátkodobé přerušování.

Extinkci v uvažovaném stacionárním a homogenním přenosovém prostředí popisuje *Bouguerův zákon* [1]

$$dI(\lambda) = -\alpha_e(\lambda) \cdot I(\lambda) dz, \quad (3.1)$$

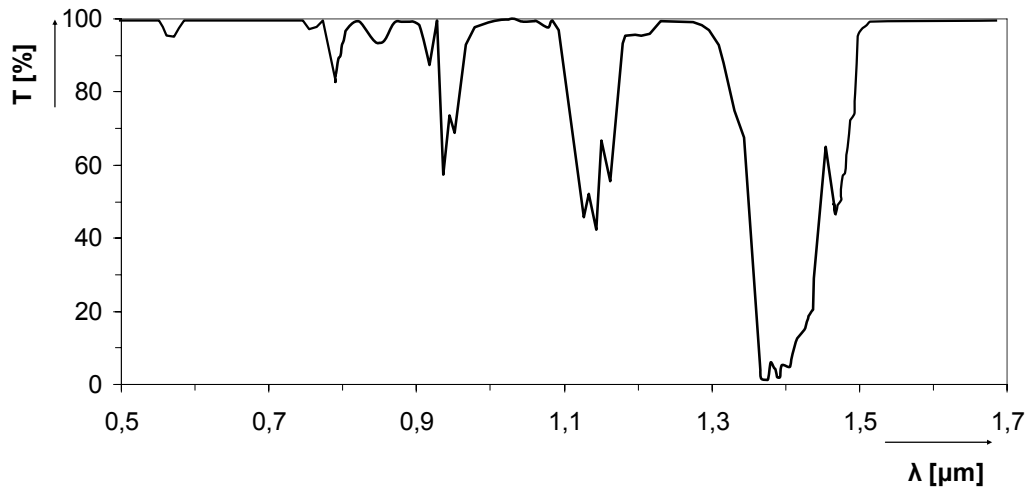
kde  $dI(\lambda)$  je zeslabení optické intenzity světelného svazku průchodem vrstvy atmosféry o tloušťce  $dz$ ,  $\alpha_e(\lambda)$  je koeficient extinkce v  $[\text{km}^{-1}]$ . Zintegrováním dostaneme vztah [1]

$$I_2(\lambda) = I_1(\lambda) e^{[-\alpha_e(\lambda)\Delta z]}, \quad (3.2)$$

kde  $I_1$  je optická intenzita na začátku vrstvy a  $I_2$  je intenzita na konci vrstvy o tloušťce  $\Delta z$  v  $[\text{km}]$ .

Další veličinou popisující přenosové prostředí je **spektrální propustnost**  $T_\lambda(\lambda)$ , která je popsána vztahem [1]

$$T_\lambda(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = e^{[-\alpha_e(\lambda)\Delta z]}. \quad (3.3)$$



**Obr. 3.1:** Závislost propustnosti „čisté a klidné“ atmosféry na úrovni mořské hladiny (délka trasy 1km a spektrální šířka čáry 1500 nm)

Extinkce je aditivní veličina, střední koeficient celkové extinkce lze tedy vyjádřit jako součet extinkcí odpovídající jednotlivým jevům [1]

$$\alpha_e = \alpha_{abs} + \alpha_{s,m} + \alpha_{s,p} + \alpha_{fluct}, \quad (3.4)$$

kde  $\alpha_{abs}$  odpovídá absorpci na molekulách,  $\alpha_{s,m}$  odpovídá rozptylu na molekulách (Rayleighův rozptyl),  $\alpha_{s,p}$  rozptylu na částicích (Mieův rozptyl) a  $\alpha_{fluct}$  střednímu zeslabení intenzity způsobené fluktuací.

Důležitou a v praxi použitelnou veličinou je **meteorologická viditelnost**  $V_M$ . Jedná se o vzdálenost, při které propustnost přenosového prostředí je rovna  $T = 0,02 = 2\%$  (při  $\lambda = 555\text{nm}$ ). Vztah mezi koeficientem extinkce a meteorologickou vzdáleností je následující [1]

$$\alpha_e(\lambda) = \frac{3,91}{V_M \left( \frac{555}{\lambda} \right)^q} ; [\text{km}^{-1}; \text{km}, \text{nm}], \quad (3.5)$$

kde  $q = 0,585 \cdot V_M^{\frac{1}{3}}$ , pro  $V_M \leq 6 \text{ km}$ .

Dalším parametrem, který popisuje zeslabení optické intenzity, se nazývá koeficient útlumu  $\alpha_{l,APP}$  v dB/km a je definován [1]

$$\alpha_{l,APP} = \frac{-1}{L_{APP}} \cdot 10 \cdot \log \frac{I_2}{I_1}, \quad (3.6)$$

kde  $L_{APP}$  je délka trasy svazku.

Závislost koeficientu extinkce na koeficientu útlumu popisuje následující vztah [1]

$$\alpha_e = 0,23 \cdot \alpha_{l,APP}. \quad (3.7)$$

Pro přehled jsou níže uvedeny hodnoty meteorologické viditelnosti a koef. útlumu pro jednotlivé stavy atmosféry (tab. 3.1) [1].

**Tab. 3.1:** Hodnoty  $V_M$  a  $\alpha_{l,APP}$  pro různé stavy atmosféry

| STAV ATMOSFÉRY        | $V_M$       | $\alpha_{l,APP}$       |
|-----------------------|-------------|------------------------|
| [-]                   | [km]        | [dB·km <sup>-1</sup> ] |
| čistá                 | 10,0 ÷ 23,0 | 1,0 ÷ 0,5              |
| opar                  | 2,0 ÷ 4,0   | 7,0 ÷ 3,0              |
| slabá mlha/silný déšť | 1,0 ÷ 2,0   | 14,0 ÷ 7,0             |
| střední mlha          | 0,2 ÷ 0,5   | 85,0 ÷ 34,0            |
| silná mlha            | < 0,5       | > 340                  |

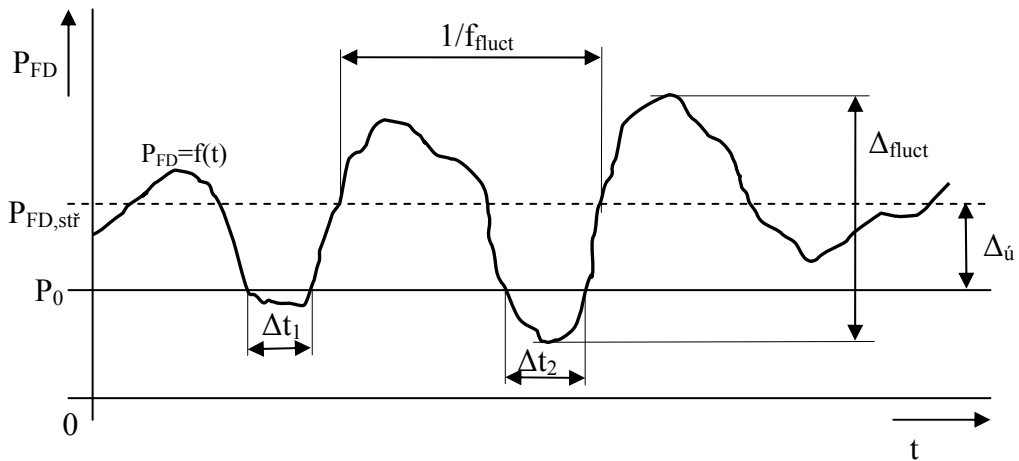
## 3.2 Turbulence

*Turbulence* je další negativní jev, který se uplatňuje v atmosféře při průchodu světelného svazku. Turbulence je chaotické proudění vzduchu a vzniká důsledkem mechanických nebo teplotních vlivů v atmosféře. Tak vzniká fluktuace indexu lomu v atmosféře, což zapříčiňuje především fluktuaci přijímaného optického výkonu. Fluktuace je možné popsat její amplitudou a frekvencí. Optický výkon na přijímači

může kmitat třeba až s kmitočtem stovek Hz. U jiných činitelů (mlha, změna směru svazku) se tak rychle změny neprojevují, řádově desítky minut až několik hodin. Problém nastává, když důsledkem turbulence se přijímaný výkon dostane pod mez citlivosti přijímače (minimální úroveň). Takovýto případ se nazývá *únik* [4].

Na obr. 3.2 [1] je v náčrtu znázorněna možná fluktuace optického výkonu na přijímači a jsou popsány parametry úniků ( $P_{FD}$  je optický výkon na fotodiodě přijímače,  $P_0$  je citlivost přijímače,  $f_{fluct}$  je frekvence fluktuací,  $\Delta_{fluc}$  je dynamika fluktuací,  $\Delta u$  je hloubka úniků,  $\Delta t_{1,2}$  jsou časy jednotlivých úniků, kdy velikost opt. výkonu je menší, než je požadováno a  $P_{FD,stř}$  je časově střední hodnota opt. výkonu na fotodiodě).

Optická turbulence může zapříčiňovat spoustu jevů jako rozšiřování svazku (změny divergence přesahující běžnou difrakci), scintilaci (fluktuace úrovně intenzity v řezu svazku, což má za následek úniky a menší odstup SNR), fluktuaci úhlu dopadu, ztrátu optické koherence, náhodné úhlové odklony svazku od přímého směru aj.



**Obr. 3.2:** Znázornění fluktuace optického výkonu na přijímači

Na rozdíl od mlhy lze rychlé fluktuace (vyvolané sněžením, deštěm, vzdušnou turbulencí) popsat analyticky. Optická turbulence lze charakterizovat Kolmogorovým zákonem „dvou třetin“ [4]

$$\langle [n(A,t) - n(B,t)]^2 \rangle_{t,stř} = C_n^2 \cdot \rho^{\frac{2}{3}} ; \quad \rho \in (l_0 - L_0) , \quad (3.8)$$

kde  $A, B$  jsou body v prostoru a čase,  $\rho$  je vzdálenost mezi body  $A$  a  $B$ , výraz levé strany rovnice je *strukturní funkce indexu lomu* a jedná se o časově středovou hodnotu,  $C_n^2$  je *strukturní parametr indexu lomu* v  $[m^{-2/3}]$ . Poslední parametr je veličina popisující míru

optické turbulence. Pro klidnou atmosféru je uváděna velikost strukturního parametru indexu lomu  $\tilde{C}_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$ , pro střední turbulenci  $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$  a silnou  $10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ .

Relativní varianci optické intenzity (neboli tzv. *scintilační index*) lze jednoduše definovat jako [4]

$$\sigma_{I,rel}^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}, \quad (3.9)$$

kde  $I$  je optická intenzita a časově střední veličina je značena  $\langle \rangle$ .

V praxi se pracuje spíše se sférickou vlnou, pro případ sférické vlny a homogenní ( $C_n^2 = konst$ ) a slabé turbulence lze odvodit vztah pro rel. varianci optické intenzity [4]

$$\sigma_{I,rel}^2 = \beta_0^2 = K_I \cdot C_n^2 \cdot \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} \cdot L^{\frac{11}{6}}, \quad (3.10)$$

kde  $\beta_0^2$  je *Rytova variance*,  $L$  je délka trasy svazku,  $K_I$  je konstanta o velikostech 1,23 pro rovinnou vlnu a 0,50 pro sférickou vlnu.

Pokud se uvažuje silná turbulence ( $\sigma_{I,rel}^2 > 1$ ), tak scintilační index se při zvětšování délky trasy nebo míry turbulence již příliš nemění. Platí pro něj [4]

$$\sigma_{I,rel}^2 = 1 + \frac{2,73}{(\beta_0^2)^{\frac{2}{5}}}. \quad (3.11)$$

Turbulence v atmosféře pochopitelně způsobuje útlum přenosové trasy, vyjadřuje se spíše přibližně podle empirických poznatků. Pro slabé turbulence ( $C_n^2 < 1$ ) lze pro odhad útlumu psát [4]

$$\alpha_{turb} = \left| 10 \cdot \log \left( 1 - \sqrt{\sigma_{I,rel}^2} \right) \right|, \quad (3.12)$$

kde  $\sigma_{I,rel}^2$  použijeme ze vztahu (3.10) a konstanta  $K_I = 0,5$ .

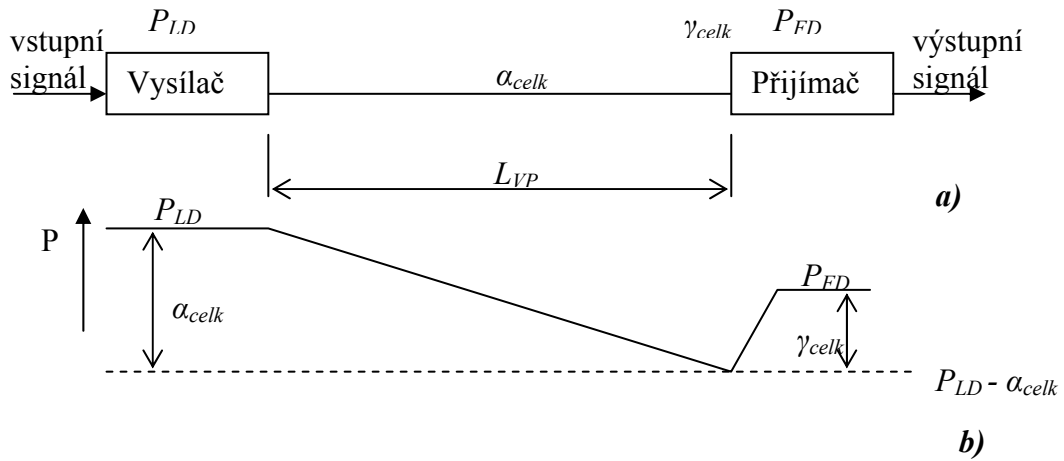
### 3.3 Výkonová bilance spoje

Energetická bilance AOS je popisována pomocí výkonové bilanční rovnice a výkonového úrovnového diagramu. Jde v podstatě o model, který popisuje výkonové úrovně v jednotlivých místech AOS, výkonové ztráty a odhadovaný celkový přijatý výkon na přijímači. Pro zjednodušení se přitom vychází z předpokladu, že je

signál přenášen gaussovským svazkem, atmosféra je homogenní a stacionární (čistá a klidná), jejíž parametry jsou  $\tilde{\alpha}_{1,atm} \approx 0,5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$  (koeficient útlumu) a  $\tilde{C}_n^2 = 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$  (strukturní parametr indexu lomu). Dále je výhodné uvažovat předpoklad, že šířka svazku je rovna průměru vysílací čočky. Na obr. 3.3 [4] je zobrazeno základní schéma přenosové cesty a její výkonový úrovnový diagram. Schéma lze jednoduše popsat výkonovou bilanční rovnicí [4]

$$P_{FD} = P_{LD} - \alpha_{celk} + \gamma_{celk} , \quad (3.13)$$

kde  $P_{FD}$  je střední výkon na fotodetektoru,  $P_{LD}$  je střední výkon laserové diody (LED),  $\alpha_{celk}$  je celkový útlum spoje a  $\gamma_{celk}$  je celkový zisk na přijímači.



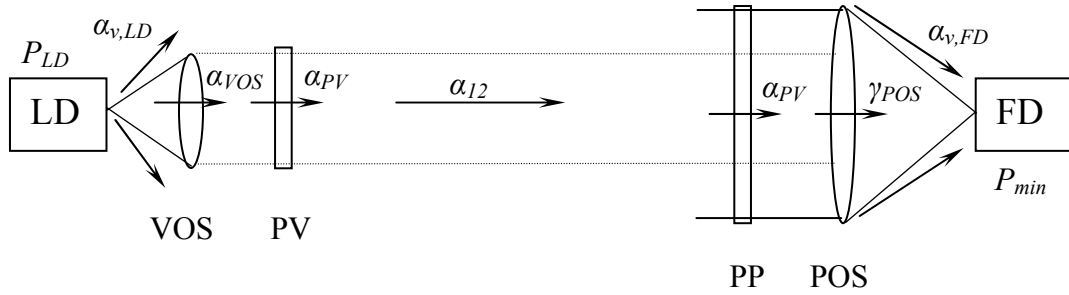
**Obr. 3.3:** a) Základní schématické znázornění jednosměrné přenosové cesty

b) Výkonový úrovnový diagram tohoto spoje

**Celkový útlum**  $\alpha_{celk}$  na spoji se dá zjednodušeně rozepsat na útlum vysílacího systému  $\alpha_{\Sigma,t}$ , útlum vzniklý šířením svazku  $\alpha_{12}$ , vyvolaný atmosférickými vlivy  $\alpha_{atm}$  a útlum přijímacího systému  $\alpha_{\Sigma,r}$ .

Energetická bilance celkově zahrnuje výkon laserové diody (LED)  $P_{LD}$ , účinnost vazby mezi laserovou diodou a vysílací optickou soustavou  $\alpha_{v,LD}$ , propustnost vysílací a přijímací optické soustavy  $\alpha_{VOS}$  a  $\alpha_{POS}$ , propustnost optických průzorů  $\alpha_{PV}$  a  $\alpha_{PA}$ , útlum šíření  $\alpha_{12}$ , zesílení přijímací optickou soustavou  $\gamma_{POS}$ , účinnost vazby mezi přijímací optickou soustavou a fotodiodou  $\alpha_{v,FD}$ , útlum zapříčiněný nepřesným zaměřením hlavic spoje  $\alpha_z$ , rezervu spoje na atmosférické přenosové prostředí  $\rho_{atm}$ , požadovanou minimální hodnotu poměru signálu k šumu  $SNR_0$ , minimální detekovatelný výkon fotodiody  $P_{min}$ , citlivost přijímacího systému  $P_0$  a úroveň přijímaného výkonu, při které

dochází k saturaci přijímače  $P_{max}$ . Tyto parametry jsou přehledně zobrazeny na obr. 3.4 [1].



**Obr. 3.4:** Veličiny energetické bilance AOS

Účinnost vazby  $\alpha_{v,LD}$  mezi LD a vysílací opt. soustavou závisí na úhlové šířce a rozložení světelného svazku a na numerické apertuře vysílací opt. soustavy. V praxi můžeme uvažovat tento útlum 1,5 dB. Útlum šířením  $\alpha_{12}$  je dán vztahem [4]

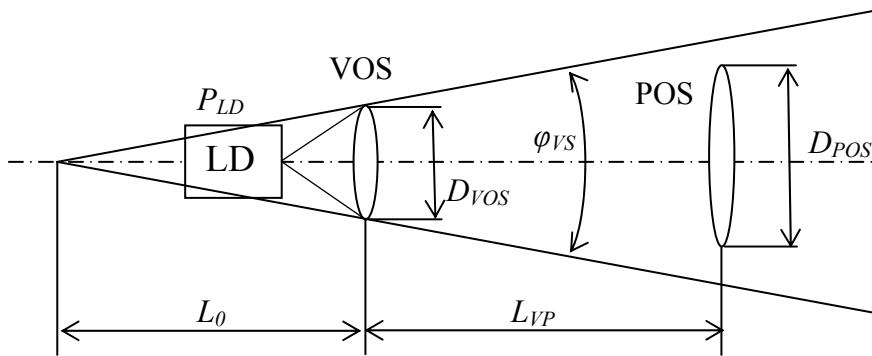
$$\alpha_{12} = \left| 20 \cdot \log \frac{L_0}{L_0 + L_{VP}} \right|, \quad (3.14)$$

kde  $L_{VP}$  je vzdálenost mezi hlavicemi a  $L_0$  je tzv. *pomocná délka* (obr. 3.5). Tu lze jednoduše zjistit pokud známe průměr vysílací opt. soustavy  $D_{VOS}$  a úhlovou šířku vysílaného svazku  $\varphi_{VS}$  ze vztahu [4]

$$L_0 \approx \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS}}. \quad (3.15)$$

Dosazením za  $L_0$  do rovnice (3.14) dostaneme praktičtější vztah pro útlum šířením [4]

$$\alpha_{12} = \left| 20 \cdot \log \frac{D_{VOS}}{\varphi_{VS} + L_{VP}} \right|. \quad (3.16)$$



**Obr. 3.5:** Znázornění pomocné délky  $L_0$  [1]

Zesílení přijímací optické soustavy určují velikosti přijímací a vysílací apertury a také rozdílné rozložení opt. intenzity gaussova svazku na vysílací, resp. na přijímací soustavě. Tento vztah je popsán [1]

$$\gamma_{POS} = \left| 20 \cdot \log \frac{D_{POS}}{D_{VOS}} \right| + 3dB, \quad (3.17)$$

kde  $D_{POS}$  je průměr přijímací optické soustavy.

Účinnost vazby mezi přijímací optickou soustavou a fotodetektozem  $\alpha_{v,FD}$  je dána poměrem aktivní plochy fotodetektoru  $A_{FD}$  ku ploše světelné skvrny  $A_{SPOT}$ , kterou vytváří přijímané světlo. Pokud platí  $A_{FD} \geq A_{SPOT}$ , pak platí  $\alpha_{v,FD} = 0$  dB. Také proto je důležité mít v konstrukci přijímače větší optickou čočku, která usměrní „rozšířený“ optický svazek opět do malého bodu na fotodetektor. Dostatečně velkou přijímací aperturou dosáhneme snížení fluktuace přijímaného optického výkonu pomocí jevu průměrování. V praxi se volí velikost průměru přijímací apertury podle vztahu [1]

$$\frac{D_{POS}}{2 \cdot \rho_0} \approx 7, \quad (3.18)$$

kde  $\rho_0$  je poloměr koherence svazku, což je poloměr kruhové plochy umístěné kolmo a symetricky k ose svazku, na které lze považovat vlnu za prostorově koherentní. Platí [4]

$$\rho_0 = \left( 0,55 \cdot k^2 \cdot L_{VP} \cdot C_n^2 \right)^{\frac{3}{5}}, \quad (3.19)$$

kde  $k$  je vlnové číslo. Koherenční plochu snižují atmosférické turbulence. Lze uvažovat při vzdálenosti hlavic 1000 m velikost poloměru koherence 0,1 m (závislost je lineární). Zvolením průměru čočky přijímače srovnatelného s průměrem koherenční plochy nastane podstatné zmenšení fluktuací přijímaného výkonu. Při dodržení této podmínky ( $D_{POS} / 2 \cdot \rho_0 = 1$ ) platí pro hodnotu relativní variance opt. výkonu  $\sigma_{I,rel}^2 = 0,1$ . Za těchto podmínek lze uvažovat hodnotu odstupe signálu od šumu  $SNR \approx 10dB$  [4].

*Rezervu spoje* na zhoršený stav počasí  $\rho_{atm}$  lze odvodit z dlouhodobého měření útlumu atmosféry. Je vhodné volit okolo  $6 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ .

Druh modulace a požadovaná chybovost  $BER$  určuje *minimální hodnotu  $SNR_0$* . *Minimální detekovatelný výkon přijímače  $P_{min}$* , značí se také  $NEP$ , závisí na přenosové rychlosti, typu použité fotodiody a šumových vlastnostech předzesilovače. Typická hodnota, např. pro fotodiodu PIN, bývá okolo  $-43 \text{ dBm}$ .

*Citlivost přijímače* je definovaná jako minimální úroveň přijatého opt. výkonu  $P_0$ , která je nutná k dosažení stanovené hodnoty  $SNR_0$ . Její vztah lze vyjádřit jako [1]



$$P_0 = P_{\min} + SNR_0. \quad (3.20)$$

*Prahová citlivost* je definována jako taková střední hodnota signálu, která dává jednotkový poměr signálu ku šumu [3].

Důležitý parametr přijímače je také úroveň přijímaného výkonu, při které dochází k *saturaci přijímače*  $P_{\max}$ . *Oblast dynamiky* přijímacího systému  $\Delta_P$  je pak definovaná výrazem [1]

$$\Delta_P = P_{\max} - P_0. \quad (3.21)$$

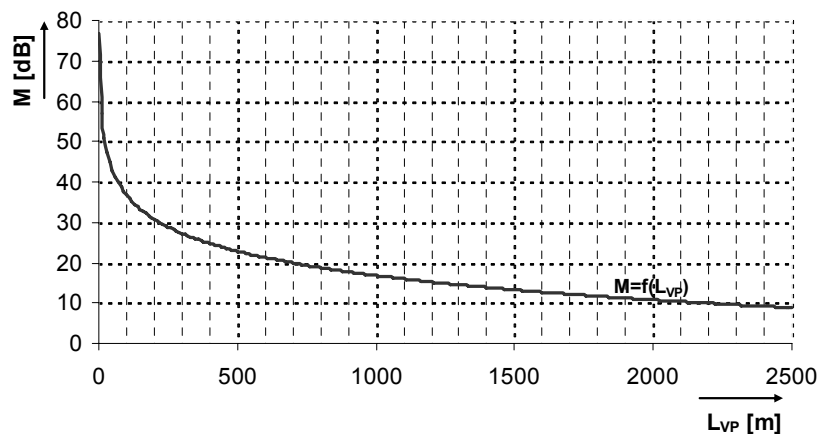
Velikost dynamiky přijímacího systému je poměrně klíčovým parametrem, protože vlivem silných fluktuací v APP hodnota vstupního optického výkonu na přijímači může kolísat s rozsahem až třeba  $\Delta_P \cong 30\text{dB}$ .

Útlum může vzniknout ještě nepřesným zaměřením hlavic spoje proti sobě, označujeme jej  $\alpha_z$ . Uplatňuje se z důvodu nezkušeností obsluhy při zaměřování, mechanickými deformacemi úchyty hlavičky při aretaci, teplotními deformacemi konzol atd. Empiricky bylo zjištěno, že útlum  $\alpha_z$  nepřevyšuje hodnotu 1,5 dB [1].

*Linková rezerva*  $M$  je rozdíl středního výkonu naměřeného na fotodektoru a citlivosti optického přijímače. Její hodnota svým způsobem vypovídá o schopnosti čelit rušivým vlivům při přenosu opt. svazku. Pokud pro  $M$  budeme uvažovat [4]

$$M \approx P_{LD} - P_0 + 20 \cdot \log \frac{D_{POS}}{\phi_{VS}} - 20 \cdot \log L_{VP} + \gamma_{add}(L_{VP}) - \alpha_{atm}(L_{VP}), \quad (3.22)$$

kde  $\gamma_{add}(L_{VP})$  je *přídavný zisk* přijímací opt. soustavy, při konstantním rozložení intenzity paprsku na přijímací čočce platí  $\gamma_{add}(L_{VP}) = 3,67\text{dB}$ . Na obr. 3.6 je znázorněná závislost linkové rezervy na délce spoje. Je vidět, že hodnota logaritmicky klesá a ve vzdálenosti 2,5 km je neustále kladná, ale již se jedná o malou hodnotu, při které by docházelo k častým únikům vzhledem k rušivým fluktuacím na výkonu.



**Obr. 3.6:** Průběh závislosti linkové rezervy na délce spoje

## 4 TEORIE SVĚTLA

Světlo je příčné elektromagnetické vlnění v poměrně úzké oblasti vlnových délek (značených  $\lambda$ ) viditelných okem. V určitých technických a vědních oborech lze považovat za světlo elektromagnetické vlnění libovolné délky. Elektromagnetická vlna je kombinací příčného postupného magnetického vlnění a vlnění elektrického. Časová změna elektrického pole budí pole magnetické a naopak. Vektory intenzity elektrického pole a magnetické indukce kmitají v navzájem kolmých směrech a navzájem budí jeden druhý. Postupná elektromagnetická vlna se šíří ve směru kolmém k oběma těmito vektorům. Pojem světelné záření lze popsat jako šíření neboli přenos energie prostorem v podobě elektromagnetických vln nebo částic. Rychlost světla ve vakuu je definována hodnotou  $299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a značí se  $c$ . Platí pro ni důležitý vztah (4.1), který zároveň popisuje závislost mezi kmitočtem a vlnovou délkou [10], [11]

$$c = f \cdot \lambda \quad (4.1)$$

Světlo popisují veličiny integrální, které popisují celkový účinek viditelného světla na všech vlnových délkách a spektrální, popisující vlastnosti jen pro určitou vlnovou délku. Veličiny popisující světlo lze rozdělit na radiometrické, označované někdy jako energetické, které popisují přenos při jakémkoli záření. Mezi ně patří zářivý tok  $\Phi_e$  [W], intenzita vyzařování  $H_e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], ozáření  $E_e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ], zářivost  $I_e$  [ $\text{W}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a zář  $L_e$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$ ].

Dalšími veličinami popisující světlo jsou veličiny fotometrické, popisující světlo viditelné okem. Jedná se o světelný tok  $\Phi$  [lm], světlení  $H$  [ $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ ], osvětlení  $E$  [ $\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$ ], svítivost  $I$  [cd] a jas  $L$  [ $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$ ] [10].

### 4.1 Dualita částice a vlnění

Elektromagnetické záření se současně může projevovat jako proud částic, označovaných jako fotony, což je patrné např. u fotoelektrického jevu, Comptonova jevu nebo u vytváření či anihilaci párů částice – antičástice [10]. V jiných případech zase vykazuje vlnový charakter, např. u případu ohybu a lomu světla [10]. Obě teorie se doplňují a pro určitý jev je nutné vybrat vhodný teoretický popis. V elektromagnetické vlně není energie rozdělena spojitě, ale je soustředěna v kvantech (shlucích), jejichž

nositelé jsou fotony, částice s nulovou klidovou hmotností pohybující se rychlostí světla. Fotony mají energii definovanou vztahem [18]

$$E = h \cdot f, \quad (4.2)$$

kde  $f$  je frekvence elektromagnetického vlnění a  $h$  je Planckova konstanta [10].

I když je klidová hmotnost fotonů nulová, působí na ně gravitační pole, důsledkem čehož dochází k zakřivování dráhy světla poblíž velmi hmotných objektů, jedná se o tzv. gravitační čočku [11].

Světlo lze tedy chápat jako fyzikální jev, který má vlnový i korpuskulární charakter. Tento jev se označuje jako *dualita částice a vlnění*. Částicová povaha záření se projevuje především v krátkovlnných oblastech (vysoké energie fotonů) a vlnová povaha v oblasti dlouhovlnného [10], [11].

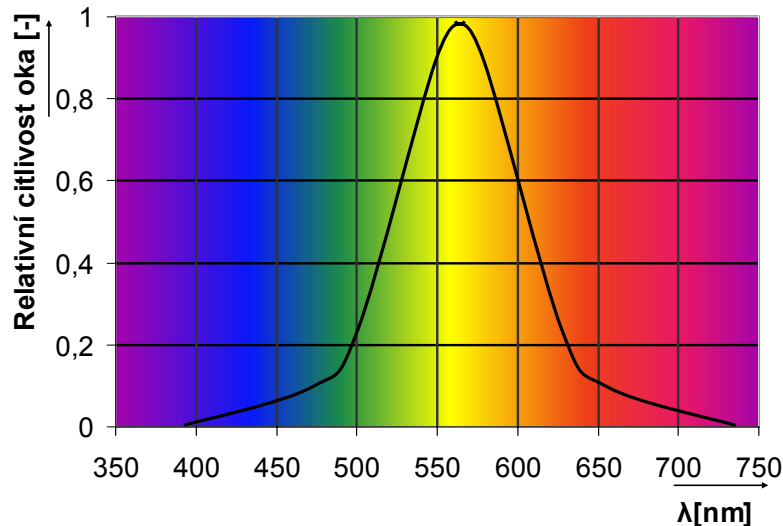
## 4.2 Typy světelného záření, jeho barva a spektrum

Libovolné záření lze rozložit na složky se sinusovým průběhem, kde každá složka je popsána kmitočtem, popř. svou vlnovou délkou. Záření o jediném kmitočtu se označuje jako *monofrekvenční*. Ve viditelné oblasti spektra vytváří každé monofrekvenční záření určitý barevný vjem, a proto se toto záření často označuje pojmem *monochromatické záření*. Ve spektru slunečního záření může oko člověka rozeznat asi 128 barevných tónů. Seřadí-li se složky záření podle jejich kmitočtů či vlnových délek, získá se *spektrum* záření. Elektromagnetické záření o vlnových délkách ležících mezi rentgenovým zářením a rádiovými vlnami (přibližně 1 nm až 1 mm) se nazývá *optické záření*. *Viditelné záření* je optické záření schopné vyvolat zrakový vjem. *Koherentní vlnění* je vlnění o stejné frekvenci, stejném směru kmitání a stejné fázi. Nejtypičtějším příkladem koherentního zdroje záření jsou lasery [11], [10].

Vlnové délky elektromagnetických vln se mohou vyskytovat ve velmi širokém rozmezí od řádu řekněme  $10^{-13}$  m až po stovky či tisíce metrů. Z toho část spektra viditelného záření tvoří jen úzkou oblast v intervalu vlnových délek od 380 nm po 750 nm. Tyto mezní hodnoty závisí na zářivém toku dopadajícím na sítnici oka a na spektrální citlivosti oka pozorovatele. Každá vlnová délka odpovídá určité barvě. S prodlužující se vlnovou délkou (klesající frekvencí) v tomto intervalu barvy postupně přecházejí od fialové přes modrou, zelenou a žlutou až k červené. Sluneční světlo se

jeví jako bílé, protože je složeno ze spojitého spektra všech barev. Záření kratších vlnových délek než viditelné se nazývá *ultrafialové záření UV* ( $\lambda \in (10^{-8}; 3,8 \cdot 10^{-7}) \text{ m}$ ), ještě kratší vlnové délky spadají do *röntgenového záření X* ( $\lambda \in (10^{-11}; 10^{-8}) \text{ m}$ ) a nejkratší vlnové délky má *záření gama g* ( $\lambda < 10^{-11} \text{ m}$ ). Větší vlnové délky než viditelné záření má *infračervené záření IR* ( $\lambda \in (10^{-7}; 10^{-4}) \text{ m}$ ), ještě větší mají *mikrovlny* ( $\lambda \in (10^{-4}; 10^{-1}) \text{ m}$ ) a největší vlnové délky mají rádiové vlny ( $\lambda < 10^{-1} \text{ m}$ ). Vlastnosti jednotlivých druhů záření se velmi liší a jednotlivé druhy jsou využitelné v různých oborech fyziky a techniky [11].

Fotony ultrafialového záření a vyšších energií jsou nebezpečné pro živé organismy, protože poškozují buňky. Země je proti nim chráněna ozónovou vrstvou, která odfiltrává záření vlnových délek kratších než 290 nm. Na povrch Země proto dopadá nejvíce záření právě ve viditelné oblasti spektra, z tohoto důvodu se u lidského zraku vyvinula citlivost právě na tento obor vlnových délek. Graf závislosti citlivosti lidského oka na vlnové délce je přibližně znázorněn na obr. 4.1 [11]. Nejvyšší citlivost má lidské oko na záření o vlnové délce cca  $\lambda = 550 \text{ nm}$ , která odpovídá maximální intenzitě světla dopadající na povrch Země [11].



**Obr. 4.1:** Závislost citlivosti lidského oka na vlnové délce  $\lambda$

### 4.3 Šíření světla a některé světelné jevy

Světlo se pohybuje v krátkých vlnách nebo jako částice nesoucí dávky energie. Jak již bylo výše uvedeno, světlo se šíří rychlostí světla  $c$ . Tato rychlost je nejvyšší

možnou rychlostí šíření signálu či informace. Světlo se v homogenním prostředí šíří přímočaře, což umožňuje zavést pojem světelný paprsek. Dva světelné paprsky pocházející z různých zdrojů se navzájem neovlivňují [18].

Světlo se šíří optickým prostředím, které může být průhledné (propouští světlo bez podstatného zeslabení), průsvitné (světlo rozptyluje všemi směry) a neprůhledné (nepropouští světlo, pohlcuje ho nebo odráží). Homogenní optické prostřední je takové, které má v každém svém bodě stejné optické vlastnosti [18].

V jiném prostředí nežli ve vakuu se světlo šíří menší rychlostí  $v$ . Podílem těchto rychlostí je udáván index lomu  $n$  daného prostředí. Důsledkem tohoto jevu dochází na rozhraní látek s různými hodnotami  $n$  k lomu světla. V prostředí s disperzí, kde je index lomu závislý na vlnové délce, je třeba rozlišovat *fázovou* a *grupovou* rychlost. Fázová popisuje rychlost šíření ploch se stejnou fází a grupová rychlost se vztahuje k obálce amplitudy, neboli k rychlosti šíření signálu. Grupová rychlost nemůže přesáhnout rychlost  $c$ , ale fázová rychlost, která není spojena s přenosem informace, může nabývat téměř libovolných hodnot, vyšších než  $c$  nebo dokonce záporných [10].

Šíření světla ve hmotě lze popsat jako opakované pohlcování a vyzařování fotonů. Po ozáření se dostane atom do excitovaného stavu, ve kterém setrvá pouze zlomek času a následně foton zpět vyzáří, ten následně pohltí další atom atd. Světlo se tak pohybuje pomaleji, protože atomy setrvávají v excitovaném stavu po určitý čas [10].

**Absorpce světla** je optický jev, který nastane, jakmile světlo dopadne na povrch předmětu. Část je pohlcena atomy povrchu daného předmětu, přičemž dojde také k velmi slabému zahřátí povrchu. Každý atomu absorbuje určité vlnové délky světla. Barva povrchu tedy záleží na tom, které vlnové délky materiál vstřebá a které odráží.

**Lom světla** je optický jev, ke kterému dochází průchodem světelného paprsku rozhraním dvou prostředí s rozdílným indexem lomu. Dochází k němu z důvodu, že v každém prostředí se světlo šíří jinou rychlostí. Zpomalení světla oproti jeho rychlosti ve vakuu je popsán indexem lomu daného přenosového prostředí.

K **interferenci** dochází při střetu dvou vln světla. Pokud se prostředím šíří současně více vlnění z různých zdrojů, tak se jednotlivá vlnění šíří takovým způsobem, jako by jiná vlnění neexistovala. V místě, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání a výsledkem je složené vlnění. Výsledný kmitavý pohyb v daném místě je dán principem superpozice kmitání jednotlivých vlnění. V důsledku interference vlnění tedy dochází v některých místech ke zvýšení (zesílení) amplitudy a v některých místech k jejímu snížení (zeslabení) [10].

## 5 ZDROJE SVĚTELNÉHO ZÁŘENÍ

Zdroj světelného záření je prvek vysílacího systému, který zajišťuje převod elektrického signálu na optický. Na rozdíl od optických detektorů existuje široká škála světelných zdrojů využitelných v bezdrátových komunikačních spojkách. V podstatě se může použít velké množství druhů luminiscenčních diod (LED) nebo laserových diod LD. Vlastnosti komunikačního systému závisí daleko více na použitém zdroji záření než-li na světelném detektoru. Typ světelného zdroje by měl být zvolen podle typu přenášené informace a vzdálenosti vysílače od přijímače. Světelný zdroj určený pro přenos se musí modulovat vstupním signálem, který chceme přenést. Modulační rychlost bude určena přenosovou rychlostí informace, kterou chceme přenést. Zdroj musí vyzařovat dostatečným výkonem, aby dosvítil na potřebnou vzdálenost a zároveň musí být dobře modulovatelný pro dosažení potřebné přenosové rychlosti. Celkový světelný výkon může být zvýšen i použitím několika vysílačů současně. Podle druhu modulace mohou pracovat vyzařovací zdroje v kontinuálním nebo impulsním režimu. V impulsním režimu zjednodušeně dochází k zapínání a vypínání zdroje a lze tak dosáhnout vyšších optických výkonů. Většinou jsou takto modulovány LD nebo IR či vysoce svítivé LED. Velikost požadované modulační rychlosti se někdy musí omezit vzhledem ke vzdálenosti komunikace a ceně zařízení [2].

### 5.1 Luminiscenční diody (Light Emitting Diodes – LEDs)

Luminescenční dioda je polovodičová dioda s jedním přechodem PN, u níž se využívá zářivé rekombinace nosičů náboje. LED nachází ve světě velmi široké uplatnění. Používají se především pro signalizaci, monitoring, informační tabule, ale i jako osvětlovací zdroje, dálkové ovládání a pro bezdrátový přenos dat. S neustále se vyvíjejícími typy LED rostou i jejich možnosti použití. Pro ne příliš náročné požadavky se v bezdrátových komunikacích často využívá jako přenosového média světlo vyzářené super svítivou diodou (SLED) nebo spíše infračervenou diodou (IR LED).

### 5.1.1 Princip činnosti

Fyzikální princip luminiscenční diody je založen na rekombinaci volných elektronů a děr. Při rekombinaci každého páru se uvolní určité kvantum energie, rovné přibližně šířce zakázaného pásu, které se může uvolnit jako záření vycházející z krystalu ven, nebo je absorbováno v krystalové mřížce, což zvyšuje teplotu krystalu. Záření se uvolňuje vlivem spontánní emise [3], u laserů se využívá emise stimulovaná. Pravděpodobnost zářivé rekombinace je mnohonásobně větší pro polovodiče s tzv. *přímým přechodem*, kde minimum vodivostního pásu je při stejném vlnovém čísle jako maximum pásu valenčního (GaAs). U *nepřímého přechodu* jsou polohy maxima a minima posunuty dále od sebe (Si). Zářivá rekombinace je pravděpodobnější s rostoucí šířkou zakázaného pásu. Vyrobíme-li diodu z GaAs, který má šířku zakázaného pásu 1,34 eV, bude již nezanedbatelná část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonů o příslušné vlnové délce. Kombinací tohoto materiálu např. s fosforem (GaAsP), získáme již materiál, z jehož PN přechodu, vyzařuje červené viditelné světlo. Barva LED v podstatě závisí na šířce zakázaného pásu materiálu, ze kterého je vyrobena její aktivní oblast. Často používané materiály jsou GaAs, GaSb, InP, InAs pro IR spektrum záření, GaP, GaAlAs pro červenou barvu, InGaP, SiC pro zelenou a modrou, GaN, GaP pro fialovou [5].

### 5.1.2 Charakteristika a vlastnosti LED

Pro aplikaci svítivých diod stačí zapojit diodu v propustném směru přes vhodný odpor na zdroj napětí. Proud diodou určuje jas a bývá okolo 10 až 20 mA a více u vysoce svítivých nebo výkonových LED. Povolené maximální závěrné napětí těchto diod bývá malé, pohybuje se kolem 3-5 V. Nejde je tedy používat jako usměrňovače napětí. Emitované záření lze snadno modulovat přímo budícím proudem. Je možné taky snížit fluktuaci intenzity záření pomocí optické zpětné vazby, která řídí budící proud podle intenzity záření [5].

Mezi základní parametry LED patří: vlnová délka vyzářeného světla, kapacita přechodu, svítivost, úhel vyzařování, maximální stejnosměrný proud a druh materiálu.

Světelné záření emitující LED je nekoherentní. Záření vystupující z diody má velkou divergenci. Na LED se proto umísťují čočky z epoxidové pryskyřice, které ji snižují a chrání diodu před mechanickým poškozením. Dále se vyznačují menší

účinností přeměny elektrické energie na optickou z důvodů reabsorpce záření v součástce a vnitřních odrazech na rozhraních [3].

LED dioda se vyznačuje menším jasnem, velkou životností i při vysoké teplotě, vyšším optickým výkonem (u vysoce svítivých diod desítky mW) a spektrální šířkou přibližně od 10 do 100 nm. Větší spektrální šířka má ale jednu výhodu, kdy činí systém odolnější proti tzv. anomálnímu rozptylu na mlze, který vzniká, když kapičky mlhy odpovídají vlnové délce záření [13]. O výhodách a nevýhodách dále pojednává kapitola 5.3.

### 5.1.3 Typy LED

Existuje spousta druhů LED lišící se svým tvarem, vyzařovaným spektrem, světelnou intenzitou atd. V bezdrátových přenosových systémech se používají převážně infračervené diody, z materiálu GaAs, GaAlAs které jsou obecně vybírány pro jejich vyšší efektivitu a vhodnější vlnové délky záření, obzvláště pokud je na přijímací straně použita křemíková PIN dioda. Případně lze použít i vysoce svítivou nejlépe červenou diodu (GaAsP), která je použita v komerčním projektu Ronja [14].

Existují LED vyzařující z oblasti PN přechodu hranově a plošně. Plošně emitující jsou většinou účinnější. Velmi dobré parametry vykazují LED s heterostrukturami [3]. Tyto diody s dvojitou heterostrukturou jsou vhodnými zdroji i pro vláknovou optiku. Splňují požadavky vysokého optického výkonu, lineární závislosti optického výkonu na budícím proudu, krátké doby života rekombinujících nosičů, úzké spektrální šířky a malé plochy emitující záření (malá divergence).

#### GaAlAs IR LED

Tyto infračervené světelné zdroje jsou mezi LED nejpoužívanější. Mají rozumnou optickou účinnost (při malých proudech 4%) a produkují záření o vlnové délce okolo 900 nm, které vyhovuje citlivostní křivce běžného křemíkového PIN fotodetektoru. Většina těchto diod může být modulována pulsy o vysokých úrovních proudu, pokud průměrný výkon nepřesáhne maximální dovolený ztrátový výkon, typicky 250 mW. Velikost proudu těchto krátkých impulsů může dosáhnout až velikosti 10A, pokud parametr obdélníkového signálu *duty cycle* je menší než 0,2 %. Některé rychlejší diody mají tak malou dobu odezvy, že zvládnou vyzařovat signál s impulsy menšími než 100 ns. Většina ale je schopna zpracovat jen pulsy delší než 900 ns. Při



velikosti proudu pulsů 2A jsou schopny kvalitní diody vyžářit světelný tok o výkonu 150mW. Při těchto vyšších proudech je obecně jejich efektivita malá ( $< 0.5 \%$ ) [2].

Většina těchto diod se svým z hledem podobají běžným světelným LED, mají buď čirou nebo tmavě fialovou hlavičku opatřenou na konci malou čočkou. Typická hodnota polovičního úhlu divergence je zhruba od 15 do 40 stupňů. Tyto diody se vyznačují nízkou cenou, střední přenosovou rychlostí (až 1Mb/s) a dlouhou životností (100 000 hodin). Jsou proto vhodné pro krátké a středního dosahu komunikačních spojů. Pokud se použije optika s velkou aperturou, může být zařízení schopno přenášet data až na vzdálenost několika km [2].

### **GaAs IR LED**

Tato dioda je starší a méně efektivní než předchozí typ. Její vyzařovací povrch je menší než u GaAlAs a tak dosahuje úzkou divergenci. Pro tuto vlastnost může být užitečná i pro aplikace využívající optická vlákna. Některé diody mají miniaturní čočku umístěnou přímo na polovodičovém čipu. V kombinaci s ještě malou čočkou (typicky 0,5") lze docílit vyzařovacího úhlu  $0,5^\circ$ . Nejdůležitější vlastnost GaAs diod je jejich rychlá odezva. Jsou obecně 10x rychlejší než GaAlAs LED, nevýhodou ale je, že produkují jen tak šestinový světelný výkon. Používají se pro střední rychlosti přenosu na krátké vzdálenosti [2].

### **GaAsP vysoce svítivá červená LED**

Ačkoli tyto světelné diody nejsou tak účinné jak předchozí zmiňované IR diody, jsou i některé červené LED použitelné v aplikacích bezdrátové komunikace na kratší vzdálenosti. Jsou označovány také jako vysoce svítivé diody vyznačující se vysokým světelným výkonem. Nicméně i tyto nejjasnější součástky produkují pouze jen třetinový světelný výkon co kvalitní infračervená dioda. Jejich velkou nevýhodou je také to, že jejich výkon bude mít na klasickém PIN detektoru poloviční účinnost z důvodu jeho nižší citlivosti na červené světlo (okolo 25%). Červené LED jsou obecně rychlejší než IR LED, pracují tak zhruba do 2 MHz, a jejich použití lze nalézt pro středně rychlostní aplikace. Vzhledem k tomu, že vyzařují viditelné světlo, poskytují velkou výhodu při zaměřování, zvláště, pokud jsou opatřeny čočkou [2].

## 5.2 Laserové diody (LD)

Jen některé druhy laserů jsou vhodné pro použití v přenosové technice. V praxi se užívají převážně laserové diody. Optické záření generované laserem je soustředěno do velmi úzkého intervalu vlnových délek. Svazek světla vycházející z tohoto zdroje je do značné míry koherentní, vyznačuje se vysokou hodnotou zářivosti a malou rozbíhavostí. Polovodičové lasery se vyznačují řadou výhod oproti ostatním laserům. Má malé rozměry, vysokou účinnost, integrovatelnost s elektronickými součástkami a snadné čerpání i modulaci injekčním elektrickým proudem. Jejich nevýhodu oproti jiným laserům je, že mají typicky mírně větší spektrální šířku čáry [3].

### 5.2.1 Princip činnosti

Jednodušší typy laserových diod jsou tvořeny PN přechodem z materiálu GaAs. Čelní plochy krystalu jsou zabroušené a tvoří nepropustné a polopropustné zrcadlo. Vlivem rekombinace majoritních nosičů nábojů je v propustném směru PN přechodem vyzařováno světlo. PN přechod je zároveň aktivním prostředím s velkým množstvím atomů v excitovaném stavu. Nově vzniklé fotony narážejí do atomů aktivního prostředí. Nedojde k pohlcení těchto fotonů, ale vytvoří se stimulovaná emise [3]. Elektron z vyšší energetické hladiny se vrací zpět na základní hladinu a vyzáří při tom foton, který způsobil emisi, tedy se stejnou vlnovou délkou a fází. V oblasti PN přechodu se vyskytují tedy již dva fotony, které opět vyvolají stimulovanou emisi u dalších excitovaných atomů. Jev se šíří lavinově. Než je světlo vyzářeno z dutiny polovodiče, několikrát se odrazí od krajních zrcadel, přičemž prochází aktivním prostředím tam a zpět. Při dosažení dostatečné energie svazku se vyzáří čelním poloprůhledným zrcadlem. Tímto způsobem dojde k zesílení záření důsledkem stimulované emise. Ke generování optického záření tedy dochází důsledkem zavedení kladné zpětné vazby, která část zesíleného signálu z výstupu přivádí na vstup. V současnosti je nejužívanějším rezonátorem v polovodičových laserech Fabry-Perotův rezonátor. Zároveň vlivem destruktivní a nedestruktivní interference vln získává světlo uvnitř dutiny charakter stojatého vlnění a ustaluje se v tzv. módech či videch. Platí, že rozměry rezonátoru jsou rovny celým násobkům poloviny daných vlnových délek záření. Za této podmínky dojde k optické rezonanci, zesílení světla a z malé čelní plochy vystupuje

intenzivní monochromatické, koherentní záření. Vlastnosti diody jsou tedy mimo jiné určeny i geometrií dutiny. Vlnová délka emitovaného záření je také daná složením polovodičů [5], [3].

### 5.2.2 Charakteristika laserových diod

Nejdůležitější charakteristikou LD je závislost optického výkonu na procházejícím proudu. Polovodičová LD se chová z elektrického hlediska podobně jako klasická dioda nebo LED. Důležitým parametrem LD je prahový budicí proud  $I_p$ . Při této úzké oblasti energie na LD dochází k náhlému přechodu z režimu spontánní emise do režimu stimulované emise, neboli k přechodu z nekoherentního zdroje záření (LED) na koherentní (LD). Po dosažení tohoto prahu, prudce vzrůstá výkon stimulovaného záření a z rezonátoru je emitováno koherentní záření lineárně závislé na velikosti budicího proudu. Současně se i zmenšuje úhel vyzařování v rovině kolmé a rovnoběžné s rovinou přechodu PN a také dochází ke zmenšení šířky pásma emitovaného záření. Prahový proud většiny LD bývá v rozmezí 30 až 250 mA. Prahové napětí cca 1,8 V. Od určité hodnoty proudu se již intenzita záření nezvětšuje - dochází k nasycení. Při překročení max. povolené hodnoty propustného proudu může dojít k přehřátí PN přechodu a zničení diody. K napájení LD je zapotřebí používat vhodné stabilizované zdroje proudu. LD jsou silně teplotně závislé, prahový proud roste s teplotou přibližně o 15% na 1°C. Její zahřívání při provozu má mimo jiné za důsledek změnu vlnové délky vyzářeného světla a zkrácení doby životnosti. Z tohoto důvodu je potřeba zajistit dostatečné chlazení LD [5].

### 5.2.3 Vlastnosti laserových diod

Vysoká směrovost svazku vyplývá z vlastností Fabry-Perotova rezonátoru, kde vznikají pouze typy vln, které se šíří podél osy rezonátoru nebo málo se vychylujících směrech. Monochromaticnost je dána tím, že k zesílení elektromagnetické vlny dochází pouze při jisté frekvenci a navíc ke generaci dochází pouze na rezonančních frekvencích použitého rezonátoru. Zářivost laseru je definována jako zářivý tok vyzařovaný z jednotkového povrchu zdroje do jednotkového prostorového úhlu. Vysoká hodnota zářivosti laserů je podmíněna vysokou směrovostí laserového svazku. Světelný svazek je vyzařován z malé plošky laserové diody eliptického tvaru o rozměrech v řádu  $10^{-6}$  m.

Odchylky reálného profilu svazku od ideálního gaussova způsobují především nerovnoměrnosti v rozměrech aktivní vrstvy. U polovodičových laserů se setkáváme s divergencí výstupního svazku, která je způsobena difrakcí světelné vlny, když je vyvážána ven z LD. Kruhová symetrie svazku se dosahuje vysílací optickou soustavou, která snižuje divergenci a vytváří kolimovaný svazek (možná implementace už v pouzdře). Ohniska svazku ve vertikální a horizontální rovině nemusí být shodná, ale bývají navzájem posunutá. Tento efekt se nazývá *astigmatismus*. Typická hodnota se pohybuje okolo 20  $\mu\text{m}$  [5].

Spektrum vlnových délek, na kterých laserová dioda vyzařuje, je velmi úzké (desetiny až jednotky nm). Spektrum laserových diod je závislé na teplotě. S rostoucí teplotou se krystal roztahuje a index lomu materiálu se zvětšuje, proto se posouvá spektrum směrem k vyšším hodnotám vlnových délek, podrobněji v [5].

LD je možné rozlišit z provozního hlediska na dva druhy diod pracujících v režimu kontinuálním nebo impulsovém. Pracuje-li LD v kontinuálním režimu, hodnota optického výkonu bývá tak 0,1 mW až 100 mW, při impulsovém ale až řádově 100 W při šířce impulsu 100 ns, více v [5]. Pokud je LD vyrobená pouze z jediného druhu materiálu, je velmi neefektivní a může pracovat pouze v impulsním režimu. V kontinuálním režimu by ji tak vysoké potřebné množství energie zničilo. Doba náběhu komunikačních LD bývá menší než 1 ns, mohou být tedy modulovány signálem až do několika GHz. Pro LD není ideální ji spínat v rychlých pulsech z úplného vypnutí rovnou na vysokou intenzitu záření. Dojde nejprve k „zašumění“ a až pak k vyzáření požadovaného tvaru. Toto „zašumění“ se nazývá *chirp* [6] a dojde při něm k rozšíření spektrální šířky svazku, svazek má tím pádem horší tvar. Pro eliminaci tohoto jevu se u LD (nebo pro urychlení i u LED) budí s tzv. *extinction ratio*, což znamená např. pro hodnotu 1:10, že místo zhasnutí při nulovém modulačním pulsu svítí dioda jen na desetinu výkonu [1], [13].

Lasery se v komunikacích vyrábějí především o takových vlnových délkách, které se nachází v tzv. komunikačních oknech, při nichž šíření v optických vláknech vykazuje malý útlum nebo kdy velikost propustnosti atmosféry dosahuje příznivých hodnot. LD pracují v typických spektrálních oknech 850, 1300 a 1550 nm. Jedna z hlavních výhod LD spočívá ve snadné přímé modulaci budícím proudem. Šířka pásma může dosáhnout řádově hodnot až několik GHz [1]. O výhodách a nevýhodách dále pojednává kapitola 5.3.

### 5.2.4 Typy laserových diod

Podle **vnitřní struktury** lze polovodičové LD dělit na: homostrukturní HoL, heterostrukturní HL, lasery s rozloženou zpětnou vazbou DBFL, lasery s kvantovými jámami QWL. A podle **místa vyzařování** na: hranově vyzařující lasery EEL a plošně vyzařující lasery VCSEL.

#### Lasery s dvojitou heterostrukturou DHL

Tyto lasery tvoří dvojitý heteropřechod. Je zde přechod z materiálu s užším zakázaným pásem, který je obklopen dvěma vrstvami materiálu se širším zakázaným pásem. Běžně používanou kombinací materiálu je GaAs s  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ . Výhodou DH laseru je, že aktivní oblast je soustředěna do tenké střední vrstvy, obklopené velkými potenciálovými bariérami, čímž se zesilování záření účastní více párů elektron-díra, které nepronikají do okolních vrstev. Navíc se díky vhodným indexům lomu odráží světlo od heteropřechodů zpět do aktivní oblasti. Prahové proudy se pohybují v rozmezí 10-250 mA. Výstupní optický výkon je v intervalu 5-25 mW. Účinnost těchto laserů se pohybuje okolo 75 % [5].

#### Lasery s rozloženou zpětnou vazbou DBFL

U těchto laserů je těsně u aktivní vrstvy naleptána difrakční mřížka, která plní roli optického rezonátoru, takže není třeba odrazů od faset (hrany zkosené pod určitým úhlem) krystalu. Z tohoto důvodu je alespoň jedna z nich pokryta antireflexní vrstvou. Difrakční mřížka navíc působí jako optický filtr, takže je zpět do aktivní oblasti odráženo jen velmi úzké spektrum vlnových délek (menší než 1 nm). Vlnová délka je určena mřížkovou konstantou. DBFL jsou vhodnými zdroji pro systémy pracující v pásmu 1,3-1,55 mm, protože díky optické mřížce umožňují jednomodový (jednovidový) provoz. Další výhodou je jejich snadná výroba. DFB dosahují velmi úzké spektrální šířky (pod 1nm) a poskytují modulační šířku pásma hluboko do oblasti GHz. Tento typ LD našel široké uplatnění v optických komunikacích [5].

#### Plošně vyzařující lasery VCSEL

Narozdíl od hranově vyzařujících laserů, které vyzařují paprsek rovnoběžně s aktivní vrstvou, vyzařují VCSEL kolmo k rovině aktivní vrstvy. Dalšími výhodami tohoto uspořádání je menší divergence vycházejícího paprsku. Vysoká odrazivost

Braggových zrcadel (mřížek) snižuje hodnotu prahového proudu, na druhou stranu klesá i vyzařovaný výkon. Účinnost těchto laserů je okolo 80 %. Tyto lasery jsou vhodné pro vláknové komunikační systémy v oblasti vlnových délek 1300 a 1550 nm, kde se používají pro velké vzdálenosti jednovlákna. VCEL se budí stejně jako LED a nepotřebuje tak žádný sofistikovaný obvod. Vysílá kvalitní kruhový svazek bez astigmatismu. Další výhodou je jejich malá velikost, lze je integrovat na čipu i několik desítek vedle sebe a tyto menší rozměry vedou k nižším prahovým proudům. V současné době jsou velkým předmětem zájmu [5].

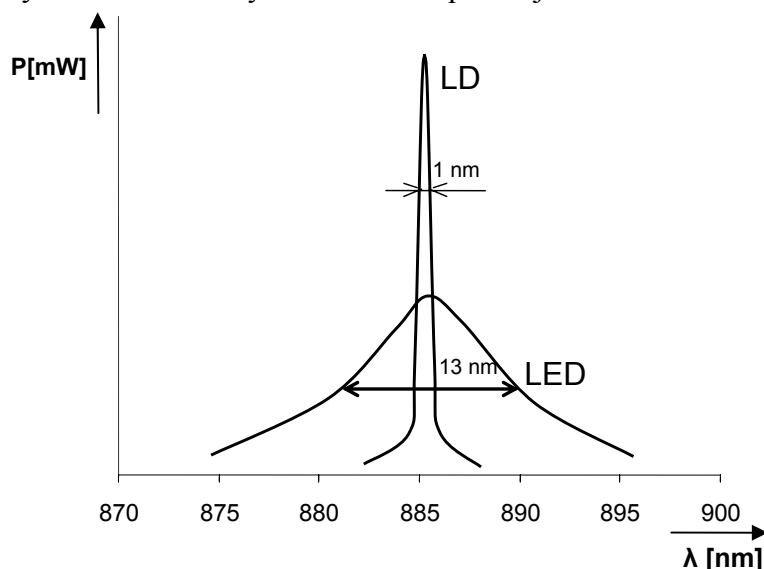
### 5.3 Srovnání optických zdrojů z hlediska bezdrátové komunikace

Existují ve většině případech pouze dvě možnosti návrhu systémů bezdrátového optického spoje. Podle toho, jestli se využije jako optický prvek, generující přenášený světelný paprsek, laserová dioda LD nebo luminiscenční dioda LED. Oba tyto zdroje mají své výhody a nevýhody.

Řada dnes dostupných systémů využívá laserové diody. Laserové diody mohou vyzařovat vysoký výkon koherentního světla z malé oblasti. Zvládají zpracovávat vyšší kmitočty modulačního signálu, tedy umožňují vysílat s větší přenosovou rychlostí. Jejich nejvýznamnějšími vlastnostmi jsou ty, že energii a výkon přenáší v úzkém vyzařovaném svazku, dále monochromaticnost, koherence a kolimovanost. Použití koherentního světla nicméně naznačuje, že světlo může interferovat samo se sebou. V atmosféře důsledkem turbulence, často způsobované scintilací, mohou různé části laserového paprsku procházet mírně odlišnými cestami. Výsledná interference vytváří kolísání výkonu na přijímači. LED na druhou stranu vyzařuje nekoherentní světlo vylučující vytvoření této interference. S laserovou diodou je možné kolimovat více energie do úzkého paprsku a následně ho lépe soustředit na přijímající fotodetektor, což výrazně zvyšuje použitelnost spoje na větší vzdálenost. Záření vystupující z laserové diody má malou divergenci (vysokou směrovost), zato z LED má světelný tok divergenci velkou. Přenášený paprsek vysílaný LED má větší plochu v průřezu a nelze ním dosáhnout tak velké vzdálenosti jako u LD. Na druhou stranu je tímto systémem stabilnější oproti rušivým vlivům v atmosféře nebo např. při chvění či posunu vysílači

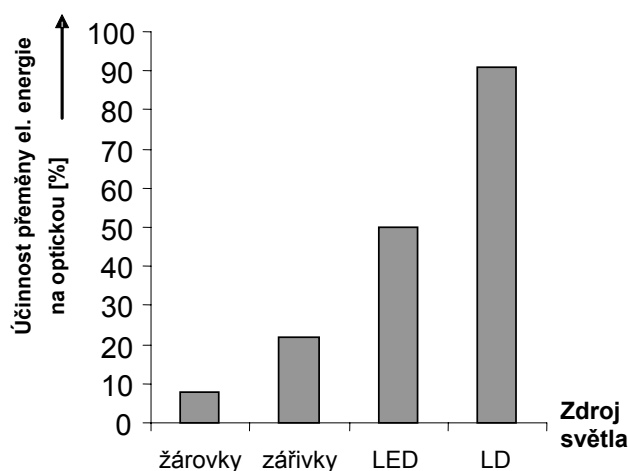
hlavice z optimální polohy [8]. Tento nedostatek se u laserů řeší použitím kolimační čočky, která úzký laserový paprsek rozšíří na rovnoběžný světelný svazek.

LD generují monochromatický paprsek, tedy spektrum vyzařovaných vlnových délek je velmi úzké (desetiny až jednotky nm), u LED diody se pohybuje mezi  $10\div 100$  nm (obr. 5.1) [5]. Tato nepříjemná vlastnost LED je ale výhodou při přenosu atmosférou, kde je tak paprsek odolnější proti tzv. anomálnímu rozptylu na mlze [2], který vzniká, když částice aerosoly rozměrově odpovídají vlnové délce světla.



**Obr. 5.1:** Zobrazení spektrální šířky LED a LD

Další důležitou vlastností je účinnost přeměny el. energie na světlo, kde LD vykazují vysokou účinnost až okolo 90 %, LED tak kolem 50 % a pro představu žárovky  $1\div 8$  % (obr. 5.2) [9].



**Obr. 5.2:** Účinnost světelných zdrojů

Bezdrátové komunikační systémy využívající LED ve vysílačích mají výhodu v menší ceně a rozměrech. Oproti LD se ale obecně vyznačují menším jasnem a menším

proudovým odběrem. Řídící elektronika pro ně je jednodušší, lze je snadno modulovat. Zatímco výstup laserové diody se významně mění s teplotou a stářím, tak LED jsou obecně daleko více stabilní a vyznačují se delší životností. U jednoduššího řídicího modulačního obvodu není u nich zapotřebí používat teplotní stabilizaci či zpětnou vazbu z výstupu pro ovládání jejího výkonu, jak je tomu potřebné u LD. Z LED jsou infračervené obecně vybírány pro jejich vyšší efektivitu a vhodnější vlnové délky záření, obzvláště pokud je na přijímací straně použita křemíková PIN dioda. Mají delší dosah než běžné LED, více se tedy používají právě infračervené diody [8].

Především pro rychlý přenos dat nebo vysokého přenášeného kmitočtu je důležitá doba odezvy (rychlost diody). LED bývají pomalejší, doba náběžné hrany se pohybuje kolem 10 ns, z čehož vyplývá pouze možnost modulace nižšími kmitočty, tedy nižší přenosová rychlost (tak do 200 Mbit/s). U laserové diody doba náběžné hrany může být menší než 1 ns (i více než 1 Gb/s). U vyšších kmitočtů je nevýhodou, že se u LD uplatňuje chirp, viz. kap. 5.2.3.

Volba použití LED nebo LD v přenosových systémech závisí na konkrétní aplikaci, její ceně a požadované spolehlivosti. Přenosové systémy většího dosahu (>1 km), potřebující přenášet informace velmi vysokou rychlostí (1 Gb/s a více), vyžadují nasazení laserových diod. Teoreticky se laserové diody více podobají dokonalému zdroji. Tyto systémy požadují precizní optiku a zajištění stability paprsku. Pro kratší vzdálenosti jsou preferované systémy používající LED. Je to dáno mimo jiné větší divergencí paprsku u LED a rychlým úbytkem výkonu se vzdáleností, čímž by bylo těžké realizovat daleké komunikace. Do určité míry toto kompenzují zvýšením optického výkonu. Některé z důležitějších parametrů jsou shrnuty v tab. 5.1 [8].

**Tab. 5.1:** Porovnání vlastností zdrojů záření

| Vlastnost                | Luminiscenční dioda LED                         | Laserová dioda LD                                 |
|--------------------------|---|---|
| Modulační rychlost       | 100÷300 MHz                                     | 1 GHz i více                                      |
| Výkon                    | závisí na rychlosti, pro vysoké rychlosti 40 mW | 100 mW, může se zesílit v optickém zesilovači     |
| Spektrální šířka         | 10÷100 nm                                       | < 1 nm  |
| Druh záření              | nekoherentní                                    | koherentní  |
| Min. výstupní divergence | široký; 0,5° (podle rozměrů)                    | úzký; 0,01°                                       |
| Životnost                | dlouhá s malým úbytkem výkonu                   | střední, výkon časem klesá                        |
| Teplotní závislost       | malá  | vysoká  |
| Řídící elektronika       | jednoduchý modulovatelný proudový zdroj         | kompensace teploty a výstupního výkonu            |
| Cena                     | nízká, běžná optika a elektronika               | vysoká, kvalitní optika a kompenzační elektronika |



## 6 FOTODETEKTORY

Přenášený optický signál je v přijímači nutné převést z optické roviny na elektrickou. Po zaměření vysílací a přijímací hlavice na sebe dopadá na optickou soustavu přijímače přenášený paprsek, která soustředí přijímaný široký světelný svazek do co nejmenší plochy světla. V tomto místě je umístěný fotodetektor, který provede konverzi optického signálu na elektrický. Po převodu je již možné signál dále zpracovávat a vyhodnocovat. V oblasti telekomunikačních optických systémů se používají výhradně polovodičové detektory. V praxi se používají prakticky jen dva druhy využívající PN přechod, a to PIN fotodiody a APD fotodiody [6].

Přijímaný signál je po průchodu atmosférou velmi slabý, počet fotonů dopadajících na přijímač je nepřímo úměrný druhé mocnině vzdálenosti. Předzesilovač by tak měl mít nízkošumové a širokopásmové vlastnosti. Fotodetektor musí mít aktivní přijímací plošku o něco větší z toho důvodu, že přijímané světlo není možné (nebo by bylo zapotřebí velmi velkých a kvalitních čoček) soustředit optikou do jednoho bodu. Tím roste kapacita diody, což zapříčiňuje pokles napěťového rozkmitu signálu fotodiody. Pokud na zařízení bez spektrálního filtru dopadá navíc sluneční světlo, uplatňuje se výstřelový šum, který vzniká náhodným rozložením jinak stejnoměrně dopadajících fotonů silného slunečního ozáření [13].

### 6.1 Vlastnosti fotodetektorů

**Kvantová účinnost** je pravděpodobnost, že jeden foton dopadající na čidlo generuje pár nosičů, které vytváří proud detektorem. Při dopadání velkého množství fotonů je kvantová účinnost rovna poměru toku generovaných párů elektron-díra přispívající k proudu ku dopadajícímu toku fotonů. Kvantová účinnost je závislá na vlnové délce světla  $\lambda$ . Fotodetektory tak mají vlastní „pracovní“ spektrum přijímaného světla. Při vyšších  $\lambda$  je účinnost malá, protože nedochází k absorpci z důvodu malé energie fotonu pro překonání zakázaného pásu. Při malých  $\lambda$  je většina fotonů absorbována v blízkosti povrchu čidla, kde fotogenerované nosiče zrekombinují dříve než se dostanou do obvodu [3].

**Citlivost** popisuje vztah mezi elektrickým proudem procházejícím detektorem a výkonem dopadajícího světla, jedná se v podstatě o koeficient úměrnosti mezi těmito veličinami. Uvádí se v jednotkách A/W [3].

Absorpcí fotonu dojde k vytvoření páru elektron-díra a generuje se tak ve vnějším obvodu náboj  $e$ . Tento náboj je dodán do vnějšího obvodu v průběhu určitého časového intervalu. Omezení rychlosti způsobují odpor a kapacita fotodetektoru a jeho obvodu. Časová konstanta RC tak způsobuje integraci proudu na výstupu detektoru, což má za následek prodloužení impulsové odezvy. Tyto jevy určují *dobu odezvy* fotodetektoru [3].

Detektor generuje ve skutečnosti náhodný elektrický proud, jehož velikost kolísá okolo střední hodnoty. Tyto náhodné fluktuace jsou považovány za *šum*. Při detekování se uplatní hned několik zdrojů šumu: *Fotonový šum*, který je nejpodstatnější složkou celkového šumu. Je zapříčiněn náhodnými fluktuacemi toku fotonů dopadajícího záření. *Fotoelektronový šum*, který vzniká ve fotonovém detektoru. Popisuje, s jakou pravděpodobností foton generuje pár elektron-díra. *Šum zesilovacího procesu* vzniká u procesu zesílení vedoucí k vnitřnímu zisku, ke kterému dochází např. v APD diodách. Každý přijatý foton vygeneruje náhodný počet nosičů, které mají průměrnou hodnotu. Nejistota počtu způsobuje tento šum. *Šum elektrického obvodu detektoru*, také přispívá k celkovému šumu a způsobují ho klasické součástky obvodu detektoru [3].

Optický přijímač můžeme charakterizovat těmito parametry (viz kapitola 3.4): *poměrem signálu k šumu, prahovou citlivostí a citlivostí přijímače*, viz kapitola 3.3.

## 6.2 Typy fotodetektorů

### 6.2.1 Fotodioda PIN

Princip obecné fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Foton dopadající na přechod PN, narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu a předá mu svoji energii. Elektron tak absorbuje energii fotonu, díky čemuž získá dostatek energie k přechodu z pásu valenčního do vodivostního. Elektron se tak odpoutá od vlastního atomu a pohybuje se prostorem krystalové mřížky. Na jeho místě vznikne díra (kladně

nabitá částice). Tyto uvolněné elektrony jsou nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče [3].

Fotodioda je plošná polovodičová dioda, které na oblast PN přechodu proniká světelné záření. Vliv osvětlení přechodu můžeme sledovat při polarizaci napětím v závěrném směru, kdy dochází k lineárnímu růstu proudu diodou při rovnoměrném zvětšování osvětlení. Odpor diody v závěrném směru je závislý na osvětlení. Reakce na změny osvětlení je velmi rychlá, řádově v  $\mu\text{s}$  až ns. Fotodioda typu PIN se skládá ze tří částí. Ze silně dotované vrstvy polovodiče P a N, mezi kterými je *intrinsická* vrstva čistého polovodiče I. Materiálem pro PIN diodu je výhradně křemík. Šířka vrstvy I musí být dostatečně tlustá, aby pohltila všechny dopadající fotony, tloušťka se pohybuje od  $1\div 200\ \mu\text{m}$ . S její rostoucí šířkou roste účinnost, tedy i citlivost. Průlet elektronů a děr ale bude trvat delší čas. Zhorší se tak dynamické vlastnosti, především šířka pásma. Schopnost absorpce polovodiče závisí na šířce zakázaného pásu a charakteru obsazení valenčního a vodivostního pásu. Míra absorpce závisí na tloušťce a teplotě dané vrstvy polovodiče a převážně na vlnové délce dopadajícího záření (tedy energii fotonů). K absorpci tak může docházet, pokud je kmitočet záření vyšší než odpovídající šířce zakázaného pásu polovodiče. Pokud bude  $\lambda$  příliš velká, dioda se bude chovat jako transparentní. Na velmi vysokých kmitočtech se dioda PIN chová jako proudově řízený odpor [3], [6], [17].

Zapojuje se v závěrném směru, kde vykazuje vyšší citlivost a kapacita přechodu je menší, tedy má rychlejší odezvu. Při nulovém přivedeném napětí za tmy dioda neinjektuje volné nosiče proudu a odezva je pomalejší. S větší hodnotou přivedeného napětí klesá kapacita diody (silnější elektrické pole) a zmenšuje se doba odezvy. Navíc VA charakteristika je v nepropustném pásmu lineární a dioda je schopná generovat větší proud [6].

### 6.2.2 Lavinová fotodioda APD

Každý dopadající foton na lavinovou fotodiodu spustí kaskádu pohybujících se párů nosičů. Slabá intenzita dopadajícího záření tak vytvoří dostatečně velký proud, který lze již snadno dále zpracovat obvody zařazenými za APD detektorem. Dioda se zapojuje v závěrném směru a přikládá se na ní vysoké závěrné napětí v řádech desítek až stovek voltů, které vytvoří na přechodu velmi silné elektrické pole. Nosiče náboje

jsou tak urychlovány, čímž získávají energii, která je dostatečná pro excitaci nových nosičů nárazovou ionizací, nastává lavinový jev [3].

Hlavní výhodou těchto fotodiod je velmi vysoká citlivost. Nevýhodou je, že musíme obstarat dostatečně vysoké napětí na tuto diodu (přes tisíc voltů). Ze svého principu (velké citlivosti) vytváří více šumu a je díky lavinovému efektu nelineární.

Používá se tam, kde je zapotřebí vysokých citlivostí. Například při detekci v bezdrátových komunikacích na velmi dlouhé vzdálenosti, pro měření vzdáleností, nebo ve výzkumných ústavech při detekci částic. Při vysokých rychlostech nad 2 Gb/s se již moc nepoužívají, kde jsou nahrazovány efektivnější kombinací optického předzesilovače a PIN diody [6], [17].

## 7 NÁVRH OPTICKÉHO POJÍTKA

### Požadavky

Navržené optické pojítka by mělo zajistit přenos nízkofrekvenčního signálu v rozmezí 20 Hz až 15 kHz (audio signálu) na vzdálenost cca 200 m. Přenosovým médiem může být libovolný světelný paprsek, který prochází volným přenosovým prostředím – atmosférou (vzduchem). Komunikace je vyžadována duplexní, tedy obousměrná. Obě hlavičky pojítka musí být tak vybaveny jak vysílačem tak přijímačem.

### 7.1 Výběr řešení

Druh optického zdroje ve vysílači, příp. i fotodetektoru v přijímači, je rozhodující pro parametry pojítka. V mém projektu optického pojítka je použit laserový modul o maximálním výkonu 5 mW a vlnové délce 635 nm. Parametry součástek a obvodů jsou uvedeny ve svých popisných dokumentech (datasheet). Datasheety integrovaných obvodů, fotodetektoru, laserového modulu a měřicích přístrojů jsou přiloženy na elektronickém datovém médiu. Laserový modul je tvořen laserovou diodou, pro něj nezbytnou řídicí elektronikou (driverem) a na výstupu LD je umístěna malá kolimizační čočka. Tento modul je v podstatě velmi podobný běžnému laserovému ukazovátku. Pro požadovanou vzdálenost je toto řešení zcela dostačující. Vlnová délka světelného paprsku se vyskytuje ve viditelném spektru, což je výhodné pro zaměřování a uvedení tak zařízení do provozu. Běžná LED by zde nevyhověla kvůli svému velkému rozptylu a velké ztrátě výkonu se vzdáleností. Bylo by ještě možné použít super svítivou luminiscenční diodu, ale jen spolu s kvalitní kolimizační čočkou. V případě použití laserového modulu již další kolimizační čočku pro požadovaný dosah komunikace nepotřebuji. Pro tuto aplikaci stačí čočka integrovaná v modulu. Takto vytvořený spoj vykazuje poměrně velkou linkovou rezervu, je tedy možné zvýšit jeho dosah. Pro vzdálenost linky v řádech desítek metrů by útlum atmosféry nemusel dosahovat vysokých hodnot a pojítka by mělo být schopno pracovat i při nepříznivém počasí, případně i při méně husté mlze.

Jako základní prvek přijímače jsem vybral fotodiodu typu PIN, viz. kapitola 6.2.1. Při porovnání s ostatními diodami je vhodná pro dané použití typ BPW34. Její

velkou předností je velikost aktivní plochy, velká citlivost a malá cena. Před tento přijímací fotodetektor je umístěna optická čočka, jedná se o konkávkonvexní (dutovypuklou) spojku. Fotodioda je umístěna v ohnisku této přijímací čočky. Slouží pro koncentrování (zaostření) divergovaného přijímaného světelného toku do malého bodu, který dopadá na fotodetektor.

Elektrické obvody jsou realizovány pomocí diskretních součástek na jednostranné desce plošných spojů. K napájení optického pojítka je požadováno přivést externí stejnosměrné napětí 12 V, např. ze síťového adaptéru. Vysílač je vybaven mikrofonním a linkovým vstupem, lze tedy komunikovat prostřednictvím i mikrofonu. Vstupní elektrický nf. monofonní signál může být jak mikrofonní, tak linkové úrovně. Typ připojeného mikrofonu může být elektretový nebo dynamický. Také je možné nastavit zesílení mikrofonního zesilovače, stejně jako u koncového zesilovače na výstupu. Zesílení v předzesilovači zajišťují dva operační zesilovače OZ integrovaného obvodu NE5532. V koncovém zesilovači postačilo použití operačního zesilovače integrovaného obvodu NE5534, který jsem upřednostnil oproti běžnému nf. zesilovači, např. LM386. Tyto obvody jsou použity pro své dobré vlastnosti, především pro velmi nízký šum, zkreslení signálu a nízkou cenu. Pro zajištění FM modulace a demodulace jsou zapojeny integrované obvody technologie CMOS HCF4046BE [7], [12]. Jedná se o obvod fázové smyčky závěsu. Vyznačuje se dobrými vlastnostmi, dobrou dostupností a nízkou cenou. Ve vysílači je využitý jen napětově řízený oscilátor tohoto obvodu, jedná se v podstatě o převodník U-f. U vysílače je také možno nastavit jas diody, aby nebyl při malých vzdálenostech mezi hlavicemi přebuzen fotodetektor, což umožňuje nasazení pojítka pro různé vzdálenosti a zjednodušuje při plném svitu zaměřování. U přijímače je využit jako převodník kmitočtu na napětí již úplný kmitočtově řízený obvod PLL.

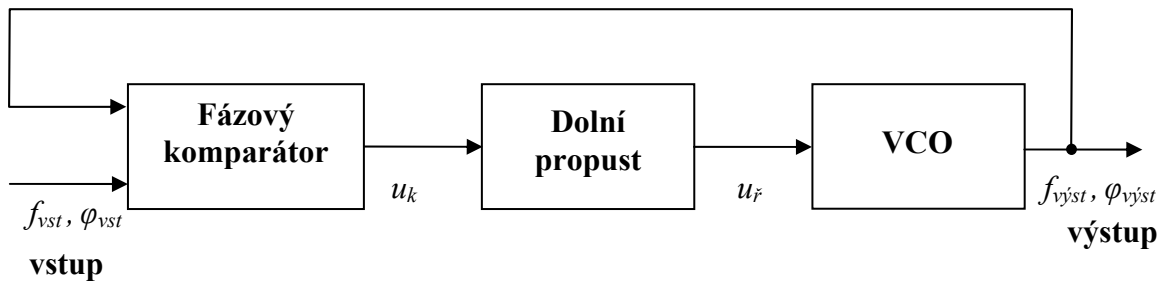
### 7.1.1 Modulace vstupního signálu

Jako modulace vstupního audio signálu na formát (tvar) signálu vhodného k přenosu a přivedení na LD je v obvodech pojítka používána frekvenční modulace (FM). Analogový signál se tak převádí na digitální obdélníkový signál. Kmitočet nosného signálu jsem stanovil na  $f_0 = 100$  kHz, který je kmitočtově rozmítaný podle úrovně modulačního signálu. Využívá se tedy impulzního režimu při buzení světelného zdroje.

FM modulace poskytuje několik výhod. Podstatné je, že eliminuje fluktuaci intenzity, zdroje šumů a další rušivé vlivy postihující šíření paprsku v atmosféře. Hodnotu středního kmitočtu nosného signálu jsem určil 100 kHz. Neuplatní se při ní rušení např. ze zářivek a nevyskytuje se v kmitočtovém pásmu určenému např. dálkovým ovladačům. Amplituda přijímaného signálu nebude mít vliv na amplitudu demodulovaného audiosignálu, pro demodulaci je podstatný kmitočet přijímaného signálu. Velkou výhodou tedy je, že přijímaný světelný signál může být velmi malý, jen je důležité, aby byl vyšší než je práh citlivosti fotodetektoru, příp. aby hodnota odstupu signálu od šumu byla ještě dostatečně vysoká. Další výhodou je jednoduchost řešení. Nevýhodou je, že FM demodulátor potřebuje dostatečný odstup signálu od šumu, alespoň 10 dB, což ale vzhledem k tak malému SNR nepředstavuje vážnější problém. Celkově tento systém bude vykazovat menší citlivost na přijímači, tedy alespoň o těch zmíněných 10 dB oproti např. amplitudové modulaci.

## 7.2 Integrovaný obvod HCF4046BE

PLL pracuje na principu schématicky uvedeném na obr. 7.1 [7]. Fázový komparátor porovnává fáze přiváděného modulovaného vstupního signálu s fází výstupního signálu napěťově řízeného oscilátoru. Na výstupu komparátoru jsou pravoúhlé kmity, jejichž doba trvání impulzů se podle fázového rozdílu mění. Průběh těchto kmitů je filtrován jednoduchou dolní propustí a takto se docílí získání stejnosměrného napětí, které reprezentuje střední hodnotu napětí impulzů komparátoru. Tímto stejnosměrným napětím je řízen výstupní kmitočet VCO. Pomocí zpětné vazby je VCO doladován na stejný kmitočet, jako má vstupní signál. Toto řídicí napětí je úměrné kmitočtu vst. signálu a představuje tedy již demodulované napětí. Pokud se jako vst. signál uvažuje kmitočtově modulovaný, na řídicím vstupu VCO se nachází střídavý nf. signál odpovídající tomuto modulačnímu kmitočtu [7].



**Obr. 7.1:** Blokové schéma smyčky jednoduchého fázového závěsu

Obvod 4046 představuje obvod smyčky fázového závěsu PLL (phase lock loop). Je vyráběn technologií CMOS, využívá tak tranzistory řízené polem (MOSFET). Tato technologie se vyznačuje nízkým příkonem, velkým rozsahem napájecího napětí a pracovních teplot a velmi vysokým vstupním odporem. Jejich nevýhodou je menší rychlost a menší zatížitelnost výstupů. Obvod 4046 má široké možnosti uplatnění. Je ho možné použít v aplikacích frekvenční modulace a demodulace, kmitočtové syntézy aj. Obvod obsahuje ve své vnitřní struktuře napětím řízený oscilátor, dva fázové komparátory, sledovač signálu pro použití u demodulace, pomocný obvod pro detekci synchronizace a zenerovu diodu pro stabilizaci napětí. Blokové schéma zapojení obvodu 4046 je zobrazeno na obr. 7.2.

VCO obvodu 4046 lze využít jako generátor obdélníkových pulzů až do kmitočtu 1,4 MHz (pro  $U_{cc} = 10$  V). Střída výstupního signálu generátoru je 1:1 (50%). Kmitočet výstupních kmitů je udáván hodnotami připojených součástek  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_1$ . Hodnota odporu  $R_2$  udává minimální nastavitelný kmitočet  $f_{min}$  a hodnota  $R_1$  udává maximální kmitočet  $f_{max}$ . Velikost kapacity kondenzátoru  $C_1$  ovlivňuje oba kmitočty. Pokud je odpor  $R_2$  nezapojen, pak  $f_{min} = 0$  Hz. Generátor je možné s dobrou linearitou rozladovat přivedením napětí (celého rozsahu napájecího napětí) na řídicí vstup. Poměr odporů  $R_2/R_1$  určují celkovou přeladitelnost generátoru. Střední kmitočet  $f_0$  představuje kmitočet výstupních kmitů generátoru při přivedení poloviny napájecího napětí na jeho řídicí vstup. Pokud  $R_2$  je nezapojen, tak střední kmitočet je roven polovině maximálního kmitočtu. Hodnoty součástek  $R_1$ ,  $R_2$  a  $C_1$  je možno odečíst z grafů závislosti  $f_0$  (příp.  $f_{min}$ ) na hodnotách  $R_1$  a  $C_1$  a z grafu závislosti poměru  $R_2/R_1$  na rozpětí přeladitelnosti, které jsou uvedeny v [7]. Je doporučeno, aby hodnoty těchto odporů se vyskytovaly v rozmezí od 10 kΩ do 1 MΩ a kapacita  $C_1$  byla větší než 50 pF. VCO a sledovač lze vypnout přivedením logické jedničky na vývod EN (pin 5). Tento generátor obdélníkového signálu využívá vysílač pojítka.



Jednodušší fázový komparátor A je realizován hradlem EX-OR. Druhý fázově-kmitočtový je složitější a využívá principu *čerpání náboje* [7]. Oba komparátory mají společný vstup (pin 14), před kterým je ještě zapojen tvarovací zesilovač tvořený čtyřmi invertujícími stupni, který přebuzením vst. signálu převede jeho tvar na pravoúhlé kmitů. V mém zapojení využívám právě komparátoru A. Stejnoseměrná složka jeho výstupních kmitů se mění od 0 V až po napájecí napětí obvodu  $U_{cc}$ , což odpovídá rozdílu vstupních fází  $0^\circ$  až  $180^\circ$  na okrajích držení. Obnovený signál na výstupu PLL má rozdíl fáze oproti vstupnímu signálu  $90^\circ$ . Při nepřivedení jednoho jeho vstupního signálu je na výstupu komparátoru polovina napájecího napětí, tedy  $\varphi = 90^\circ$ . Hodnoty vnějších součástek  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  jsou navrženy tak, aby VCO generoval při tomto stavu obdélníkový signál o středním kmitočtu  $f_0$ . Platí [7]:

$$f_0 = \frac{(f_{max} + f_{min})}{2} ; \text{ pro } R_2 = \infty \text{ je } f_{min} = 0 \text{ Hz} . \quad (7.1)$$

Tento komparátor je velmi odolný proti šumu. Při velkém rozsahu přeladění VCO ale může docházet k přeskokům na střední kmitočet. Toto souvisí s pásmem zachycení  $2f_C$ , což je kmitočtový rozsah vst. signálu, při němž je smyčka schopna dostat se do zavěšení i pokud v něm předtím nebyla. Šířka oblasti je dána zejména mezní frekvencí  $f_m$  filtru DP. Pokud však jsou frekvence vstupního a porovnávacího signálu velmi rozdílné, součtový a rozdílový signál se nachází mimo pásmo propustnosti dolní propusti a na vstupu VCO není žádné řídicí napětí. Napětím řízený oscilátor tak kmitá na své vlastní frekvenci  $f_0$ .

Pásmo držení  $2f_H$  odpovídá kmitočtovému rozsahu, v němž je smyčka schopna udržet se v závěsu. Pásmo držení je dáno kmitočtovým rozsahem  $f_{max} - f_{min}$ . Rozprostírá se symetricky kolem vlastní frekvence VCO a nezávisí na šířce pásma filtru. Vyjadřuje, v jakém kmitočtovém rozsahu vstupní frekvence je zachycený fázový závěs schopen sledovat vstupní řídicí signál. V ustáleném stavu při konstantní vstupní frekvenci je fázový posun mezi napětími konstantní a výstupní signál demodulátoru je nulový. Frekvence oscilátoru VCO dokáže sledovat frekvenci vstupního signálu v rozpětí  $f_{max} - f_{min}$  jen za předpokladu, že obvod fázového závěsu byl předtím ustálený.

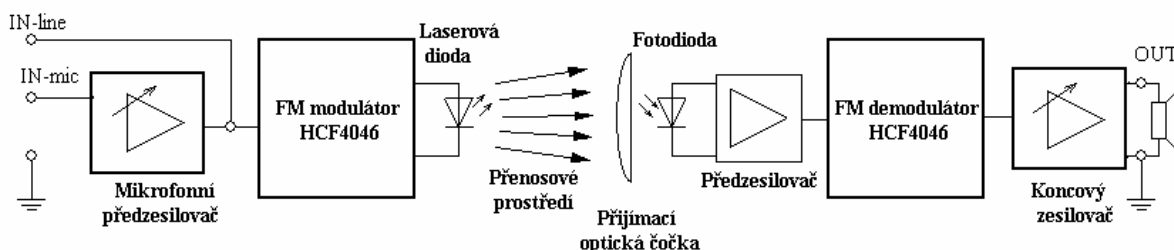
U použití tohoto komparátoru je pásmo zachycení menší než pásmo držení a platí [7]:

$$2f_C < 2f_H ; \quad 2f_C \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2\pi(f_{max} - f_{min})}{R_3 \cdot C}} . \quad (7.2)$$



### 7.3 Popis zapojení vysílací a přijímací části

Schémata zapojení obvodů vysílací a přijímací části optického pojítka jsou uvedené v Příloze A. Na obrázku 7.1 jsou uvedeny jednotlivé bloky zapojení přijímací a vysílací části. Podrobněji pojednávají o zapojeních jednotlivých bloků následující dvě podkapitoly.



*Obr. 7.3: Blokové schéma zapojení optického pojítka*

#### 7.3.1 Popis obvodu vysílače

Obvody optického pojítka vyžadují přivedení externího stejnosměrného symetrického napájení 12V. Je nutné přivést takto vyšší napětí, protože jsou pro stabilizaci napětí použity obvody 7809, které toto vyžadují a zajišťují na svém výstupu stabilní 9V napětí. Pro zajištění dostatečně malého ztrátového výkonu na nich a oddělením napájení pro vysílače a přijímače jsou použity dva obvody 7809. Ve zapojení jsou použity stabilizátory, protože je nutné zajistit neměnné napájecí parametry z důvodů použití obvodů VCO, smyčky fázového závěsu nebo také pro napájení LD. Pro napájení všech obvodů je použito stejnosměrné napájecí napětí 9V. Je důležité použít napájecí zdroj s **kvalitním uzemněním** nebo alespoň aby byla připojena signálová zem externího dobře uzemněného audio zařízení. Je tak žádoucí, aby zdroje měly tříkolíkovou zástrčku do rozvodné sítě. V zapojení pojítka jsou mimo jiné audio obvody, kde případná plovoucí zem vytváří brum. Na druhé straně kabelu přivedeného do pojítka je vhodné zapojit všechny zemní potenciály do jednoho bodu.

Vysílač je možné rozdělit na tři části: předzesilovací stupeň pro mikrofon, modulovací stupeň a laserový modul s budičím obvodem.

Pro schéma obvodu mikrofonního předzesilovače jsem vycházel ze zapojení „Univerzálního mikrofonního zesilovače“ uveřejněného v [19], které jsem upravil pro svou potřebu. Jak jsem již výše uvedl, lze jej použít pro zesílení signálu přicházejícího

jak z elektretového mikrofону (propojení pinů 2-3 u jumperu JP1), tak z dynamického (propojení pinů 1-2 u JP1). Pomocí této propojky určíme vstupní impedanci předzesilovače. Můžeme použít dynamický mikrofón do impedance  $1000\Omega$ . Základem předzesilovače jsou dva operační zesilovače OZ. Použil jsem typ NE5532, který v jednom pouzdře DIL8 obsahuje dva OZ. Celkové zesílení je dáno vztahem:

$$A = |A_1 \cdot A_2| = \left| \left( 1 + \frac{R_{12}}{R_{11}} \right) \cdot \left( -\frac{R_{18}}{R_{15}} \right) \right| = 8,7 \cdot \frac{R_{18}}{R_{15}}. \quad (7.3)$$

Hodnotou odporu trimru  $R_{18}$  udává velikost zesílení, jehož absolutní hodnota se může pohybovat v rozmezí od 0 do 218 což je po převodu na relativní zesílení od 0 do 47 dB. Jednoduše by tento rozsah šel upravit změnou např. velikostí odporu  $R_{12}$ .

Mikrofonní signál je nejprve oddělen blokovacím kondenzátorem  $C_{16}$  pro propuštění pouze střídavé složky. Následně je zařazen neinvertující zesilovač se zesílením  $A_1$  (vztah 7.3). Jeho výstup je od dalšího již invertujícího zesilovacího stupně oddělen odporem  $R_{15}$ , který spolu s proměnným odporem  $R_{18}$  určuje zesílení  $A_2$  (7.3). OZ obvodu NE5532 jsou navrženy pro symetrické napájecí napětí, proto jsou symetrické vstupy OZ připojeny na virtuální nulu tvořenou děličem o stejných odporech  $R_{16}$ ,  $R_{17}$ . Přivedením poloviny napájecího napětí na tento vstup se zvýší ofset a OZ může zesilovat horní i dolní půlvlny signálu i bez přivedení symetrického napájení. Výsledný výstup předzesilovače je ještě nutné za vazebním kondenzátorem  $C_{10}$  oddělit odporem  $R_{19}$  o hodnotě  $100\Omega$ , aby nedocházelo k ovlivňování řídicího vstupu napětím řízeného oscilátoru VCO (IC2).

U zapojení FM modulátoru a buzení laserového modulu jsem byl inspirován schématem „Číslicového optického vysílače s kmitočtovou modulací“ uvedeném v [12]. V zapojení vysílače používám pouze napětově řízený oscilátor integrovaného obvodu 4046. Na výstupu VCO (pin 4) je obdélníkový signál o středním kmitočtu  $f_0 = 100\text{ kHz}$ , jehož kmitočet pulzů se mění v závislosti na přiváděný signál z linkového nebo zesíleného mikrofonního vstupu. Vstupní signál se přivádí přes oddělovací kondenzátor na vstup VCO (pin 9). Je vhodnější kvůli zvýšení odstupu signál-šum přivádět spíše vyšší úroveň vst. audio signálu, kdy tak bude stačit nastavit menší zesílení na výstupním zesilovači. Maximální dosažitelný kmitočet  $f_{max}$  generátoru obvodu 4046 je dán hodnotami odporu  $R_8$  (pin 11) a kondenzátoru  $C_7$  (piny 6, 7).  $R_8$  je proměnný odpor, kterým můžeme tuto důležitou vlastnost VCO v případě potřeby upravit. Pro volbu

$f_0 = 100 \text{ kHz}$  ( $f_{\max} = 200 \text{ kHz}$ ) jsem stanovil hodnoty těchto součástek z grafů uvedených v [7] a podle orientačního výpočtu [7]:

$$f_0 \doteq \frac{1}{R_8 \cdot (C_7 + 32 \cdot 10^{-12})} \Rightarrow R_8 \doteq \frac{1}{f_0 \cdot (C_7 + 32 \cdot 10^{-12})} = \underline{\underline{75,76 \text{ k}\Omega}} \quad (7.4)$$

Hodnotu  $C_7$  jsem určil 100 pF. Pro hodnotu  $f_{\min} = 0 \text{ Hz}$  jsem ponechal vývod 12 u VCO nezapojen.

Odporový trimr  $R_6$  přivádí stejnosměrné napětí na řídicí vstup VCO a slouží tak pro nastavení středního kmitočtu výstupních kmitů VCO. Nastavil jsem jej na polovinu řídicího napětí, aby byl kmitočet nosné polovina maximálního generovaného kmitočtu (100 kHz). Dochází k rozmitání výstupního kmitočtu od tohoto středního kmitočtu v rozsahu 0 až 200 kHz. Odbočka trimru je připojena s řídicím vstupem přes odpor 100 k $\Omega$ , aby byl řízen jen napětím a neprocházel proud z napájecí větve. Dále je zapojen vývod zenerovy diody (pin 15), která spolu s odporem  $R_5$  a kondenzátorem  $C_9$  slouží pro stabilizaci napájecího napětí z důvodu většího proudového zatížení laserového modulu. Změna tohoto napětí by tak způsobovala zpětně změnu  $f_0$ . Blokování (pin 5) je ještě připojeno na zem, kdy není aktivováno. Ostatní vývody obvodu zůstávají nevyužity.

Pro buzení laseru jsou využity tranzistory  $T_1$  a  $T_2$  zapojené v Darlingtonově zapojení, které zajišťují dostatečně velký proud pro buzení laseru. Záporné impulzy vyvolávají bázevý proud tranzistorů, který je zesílen a způsobuje pulzy záblesků na LD. Prvky  $R_2$  a kondenzátor  $C_6$  slouží jako filtrační člen, aby se nešířili proudové impulzy po napájecím vedení do jiných částí zapojení. Pro zajištění předpětí a tedy i dostatečného bázevého proudu pro budící tranzistory je zapojen odporový dělič  $R_3$ ,  $R_4$ . Zapojený odpor  $R_2$  slouží pro omezení napětí na laserovém modulu. Odporovým trimrem  $R_1$  lze nastavovat napětí na modulu, tedy jeho jas. Při nastaveném  $R_1 = 0 \Omega$ , je na modulu napětí 3,3 V. Jedná se o stejnosměrné napětí, které je pro průchod laserovou diodou směrodatné. Od 3 V se již intenzita světla příliš nemění a napětí by mělo zůstat nejvíce na této hodnotě. Větší intenzitu výstupního paprsku je vhodné nebo nutné nastavit při větší komunikační vzdálenosti, při zaměřování nebo např. při zhoršených atmosférických podmínkách.

### 7.3.2 Popis obvodu přijímače

Obvody přijímače zajišťují převod laserového záření zpět na nf. audio signál. Zapojení se dá rozdělit na tři bloky: předzesilovač slabého signálu fotodetektoru (vstupní stupeň), kmitočtový demodulátor (modulační stupeň) a koncový zesilovač (výstupní stupeň).

U zesilovače pro malý signál fotodiody jsem vycházel ze zapojení „Stavebnice pro přenos zvuku infračerveným zářením“ uvedeného v [21]. Fotodetektor zde představuje fotodioda BPW34, která mění světelný tok na elektrické napětí. V závislosti na intenzitě osvětlení fotodiody prochází diodou zapojenou v závěrném směru malý proud, který vyvolá úbytek napětí na sériově zařazeném rezistoru. Anoda fotodiody je připojena na gate polem řízeného (N-FET) tranzistoru  $T_3$  typu 2SK170. Je použit pro impedanční přizpůsobení, poněvadž má velmi vysokou vstupní impedanci. Také vykazuje velmi malý vlastní šum. Další zařazené již bipolární nízkošumové tranzistory BC550B slouží pro další zesílení signálu.

Takto zesílený signál je přiveden přes vazební kondenzátor  $C_{24}$  na vstup fázových komparátorů (pin 14). Hodnoty prvků  $C_{23}$  a  $R_{29}$  určují, aby střední kmitočet  $f_0$  u VCO byl stejný jako na vysílači, a to 100 kHz. Tak bude platit, že  $R_{29} = 75 \text{ k}\Omega$  a  $C_{23} = 100 \text{ pF}$ . Pásmo držení tak bude  $2f_H = 200 \text{ kHz}$ . Pro přesnější nastavení nebo případnou dodatečnou změnu je odpor  $R_{29}$  řešen jako trimr. Používám u obvodu 4046 komparátor typu A. Vstupy komparátoru představují vstupní modulovaný signál z fotodiody (pin 14) a výstup VCO. VCO je řízen výstupem fázového komparátoru A (propojení pinů 2, 9). Je tak automaticky doladován, aby jeho výstupu kmital o stejné frekvenci jako vysílaný signál detekovaný na fotodiodě. Výstupní signál fázového komparátoru obsahuje ale velký podíl kmitočtu vstupního signálu se superponovanými vyššími harmonickými. Tyto harmonické jsou potlačeny pomocí kmitočtového filtru typu dolní propust. Nastavení tohoto filtru udává rozsah zachycení kmitočtu  $2f_C$ , tedy určuje dynamické vlastnosti smyčky fázového závěsu. DP je tvořena ve schématu součástkami  $C_{25}$  a  $R_{26}$ . Hodnotu jsem empiricky zvolil  $R_{26} = 100 \text{ k}\Omega$  a  $C_{25} = 1 \text{ nF}$ . V tomto případě hodnoty prvků udávají **šířku zachycení** přibližně  $f_C = \pm 17,8 \text{ kHz}$  kolem středního kmitočtu  $f_0$ , což je dostatečná a vhodná šířka pásma pro audio přenos. Pro výpočet  $f_C$  jsem vyšel ze vztahu 7.2:

$$2f_c \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2\pi(f_{\max} - f_{\min})}{R_{26} \cdot C_{25}}} = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2\pi(2 \cdot 10^5 - 0)}{10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-9}}} = \underline{\underline{35,68 \text{ k}\Omega}} \quad (7.5)$$

Za kmitočtovým filtrem je již nf. signál, který je přiváděn do vysílače. Ještě je zesílen v obvodu 4046 a poslán na výstup (pin 10). Funkce obvodu smyčky fázového závěsu je tedy dána hodnotami prvků DP ( $C_{25}$ ,  $R_{26}$ ) a prvky určujícími střední kmitočet VCO ( $C_{23}$ ,  $R_{29}$ ). Zenerova dioda (pin 15), odpor  $R_{27}$  a kondenzátor  $C_{26}$  stabilizují napájecí napětí obvodu 4046. Bližší popis integrovaného obvodu 4046 je uveden v kapitole 7.2.

Koncový zesilovač je určen pro zesílení výstupního signálu demodulátoru na úroveň vhodnou k buzení menšího reproduktoru, příp. sluchátek. Jeho zapojení jsem převzal upravil z „Jednoduchého zesilovače pro sluchátka“, který se nachází v [20]. Vstupní obvody a budicí stupeň je tvořen nízkošumovým obvodem NE5534. Výstupní signál FM demodulátoru je přes kapacitní vazbu a odpor  $R_{30}$  přiveden na invertující vstup OZ obvodu NE5534. OZ je napájen nesymetrickým napětím, je tedy jako u obvodu předzesilovače nutné vytvořit umělou (virtuální) zem (dělič tvořený odpory  $R_{31}$ ,  $R_{32}$ ), která je připojena na neinvertující vstup OZ. Zesílení je regulovatelné pomocí trimru  $R_{33}$ . Nejvyšší možné zesílení je asi 3,7, neboli 11,3 dB. Tato velikost je pro danou aplikaci dostatečná. V případě potřeby stačí vyměnit prvek  $R_{33}$  za trimr s větší hodnotou. Je také možné zaměnit tranzistory  $T_6$  a  $T_7$  za výkonnější. Komplementární dvojice koncových tranzistorů  $T_6$  a  $T_7$  pracují bez předpětí v třídě B. Účinnost jejich provozu je tedy poměrně malá, výhodou ale je teplotní stabilita. Výstupní výkon je přibližně 1W. Zpětná vazba mezi výstupem koncového stupně tranzistorů a vstupem OZ kvalitního obvodu NE5534 má za následek výrazné potlačení přechodového zkreslení. Výstup z emitorů koncových tranzistorů je přes vazební kondenzátor  $C_{30}$  přiveden na výstup. Pro lepší přenos nižších kmitočtů jsem použil elektrolytický kondenzátor o kapacitě kapacitu 470  $\mu\text{F}$ .

Obvod PLL se bude chovat v podstatě jako pásmová propust s šířkou pásma  $2f_c$ . Budeme tak uvažovat **kmitočtový zdvih**:  $\Delta f = 2f_c = 35 \text{ kHz}$ . **Index modulace  $\beta$**  je definován vztahem [16] :

$$\beta = \frac{\Delta f}{F_{\max}} = \frac{35 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^3} \doteq \underline{\underline{2,2}}, \quad (7.6)$$

kde  $F_{\max}$  je nejvyšší uvažovaný kmitočet modulačního signálu.

**Šířku přenosového pásma** mohou přibližně stanovit podle Carsonových odhadů [16]:

$$B \cong 2 \cdot (\Delta f + F_{\max}) = 2 \cdot (35 \cdot 10^3 + 16 \cdot 10^3) \doteq \underline{\underline{102 \text{ kHz}}} \quad (7.7).$$

Rozsah vstupního modulačního napětí, kdy modulovaný signál nepřesáhne pásmo zachycení se určí ze vztahu 9.1:

$$f = k \cdot U_{\tilde{r}} + f_{\max} \Rightarrow U_{\tilde{r}} = \frac{(f_c + f_0) - f_{\max}}{k} = \frac{117,8 \cdot 10^3 - 200 \cdot 10^3}{-31} = \underline{\underline{2,65 \text{ V}}} \quad (7.8)$$

Tato hodnota se ještě musí odečíst od napětí při nosném kmitočtu  $f_0$ . Pak maximální hodnota amplitudy vstupního modulačního signálu je:

$$U_{\text{mod, max}} = 3,45 - 2,65 = \pm 0,8 \text{ V} \Rightarrow U_{\text{RMS}} = \underline{\underline{0,566 \text{ V}}} \quad (7.9)$$

## 7.4 Laserový modul

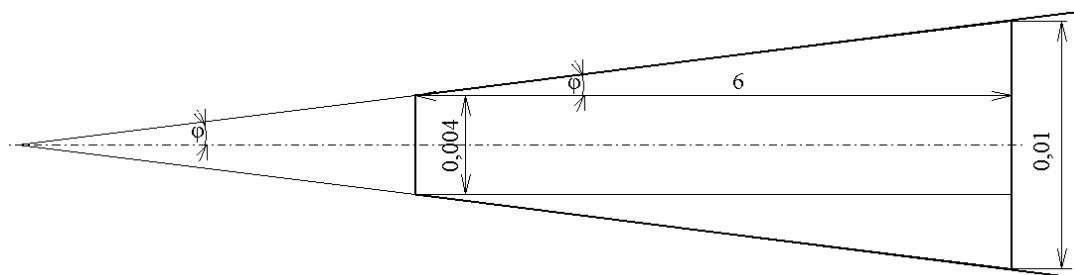
Navržené optické pojítka přenáší informaci pomocí laserového paprsku, který je generován laserovým modulem. Vlnová délka záření je  $\lambda = 635 \text{ nm}$  a maximální vyzářený výkon je **5 mW**. Výhodou pro tuto vlnovou délku je vysoká propustnost atmosféry (obr. 3.1) a výskyt ve viditelném spektru. Nevýhodou menší citlivost detekce této vlnové délky fotodiodou a větší nebezpečí poranění očí. Jedná se o polovodičový laser Fabry-Perrotova typu. Světelná stopa emitujícího svazku tedy není kruhová, ale má eliptický tvar. Kruhová nesymetrie pramení z principu Fabry-Perrotova rezonátoru, malý vliv má i nedokonalá použitá optika v pouzdře. Výhodou je, že pouzdro modulu již v sobě sdružuje samotnou laserovou diodu, její řídicí obvod (driver) a koliminační čočku určenou pro rozšíření světelného svazku vystupujícího z diody. Průměr této čočky, tedy i šířka světelného svazku v místě vystupujícím z pouzdra modulu, je zhruba 4 mm, což odpovídá ploše cca  $12,6 \text{ mm}^2$ . Další výhodou je malá cena. Běžné rozměry světelné stopy na rovině kolmé ke směru šíření ve vzdálenosti 6 m od modulu jsou uváděny  $6 \times 10 \text{ mm}$ . Z těchto údajů vyplývá, že poloviční vyzařovací (divergenční) úhel je roven v ose y (obr. 7.4):

$$\sin \varphi = \frac{0,001}{6} \Rightarrow \varphi \doteq 9,55 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{34 = 0,17 \text{ mrad}}} \quad (7.10)$$

a v ose z (pokud uvažujeme Kartézskou soustavu a osa x je ve směru šíření paprsku):

$$\sin \varphi = \frac{0,003}{6} \Rightarrow \varphi \doteq 28,65 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{1' 43'' = 0,50 \text{ mrad}}} \quad (7.11)$$





**Obr. 7.4:** Divergence laserového paprsku na vzdálenosti 6 m v ose z

Ve vzdálenosti 200 m bude světelná stopa přibližně 20x33 cm.

Maximální povolený procházející proud modulem je 50 mA. Směrodatná probuzení laseru je jeho stejnosměrná hodnota. Typický úbytek napětí by měl být 3 V. Modul je schopný pracovat v rozmezí teplot -10 až 40 °C a jeho životnost je výrobcem stanovena na průměrně 3000 hodin. Modul bývá vybaven omezovačem proudu, aby nedošlo k přehřátí a zničení LD při přivedeném velkém proudu. Je tedy žádoucí, aby LD pracovala v režimu, kdy se neuplatní omezovač a nedochází k oříznutí přiváděného signálu.

Tento laser pracuje v impulzním režimu a řadí se do bezpečnostní třídy III a). Laserový modul nese označení ML-SHW-635-05-D a je vyroben firmou SHAWO HWA INDUSTRIAL CO., LTD.

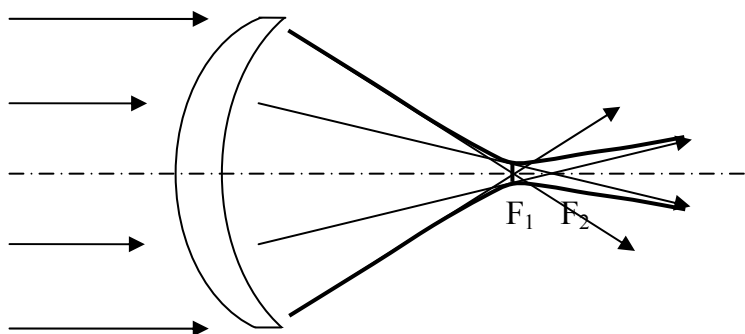
## 7.5 Optická přijímací čočka

Přijímač je vybaven optickou spojnou konkávkonvexní (dutovypuklou) čočkou. Při dopadu rozšířeného světelného svazku na tuto čočku dochází k soustředění jeho optické intenzity. Aktivní plocha fotodiody je příliš malá a bez použití této optiky by většina záření nebyla detekována. Tak je zajištěno, že dopadající intenzita světla je větší než prahová citlivost fotodiody. Světelný tok vystupující z laserového modulu se vyznačuje určitou divergencí a na přijímací straně by byl příliš široký, proto je použití přijímací čočky zcela na místě. Navíc umožňuje zvýšit dosah komunikace, zjednodušuje zaměření, eliminuje drobné změny polohy hlavic, nekruhovost světelné stopy a lépe se vyrovnává s chvěním vysílací nebo přijímací hlavičky. Čočka je schopna „zpracovat“ velmi rozptýlený světelný svazek, uvádí se tak sedminásobek průměru přijímací čočky, což v tomto případě činí průměr asi 45 cm. Vzdálenosti 200 m, kdy stopa dopadajícího

paprsku bude zhruba 20x33 cm, by neměla představovat závažnější problém. Záleží ale pochopitelně také na intenzitě paprsku.

Čočka je zhotovena z minerálního čirého skla o indexu lomu jeho materiálu  $n = 1,523$ . Průměr čočky je 6,5 cm, což dostačuje na danou vzdálenost. Optická mohutnost (dioptrie) je rovna  $D = 6,0 \text{ m}^{-1}$ , ohnisková vzdálenost je  $f' = 16,6 \text{ cm}$ , jedná se o převrácenou hodnotu počtu dioptrií. V této vzdálenosti od čočky je také umístěna fotodiody. Čočka není opatřena antireflexní vrstvou. Část optického výkonu se tak ztrácí. Výhodou je menší cena a lepší viditelnost při zaměřování.

U této čočky se projevují vady, konkrétně barevná a sférická (otvorová) [1]. Barevná vada vzniká důsledkem toho, že ohnisková vzdálenost závisí indexu lomu, který se mění podle barvy použitého světla. Různé indexy lomu se tak lámou jinak a dochází k rozkladu světla. Vzhledem k použití monochromatického nosného paprsku nemusíme tuto vadu vůbec uvažovat. Otvorová vada vzniká v případě, kdy na čočku dopadá široký světelný svazek, přičemž se paprsky vzdálenější od optické osy protínají v jiném místě než paprsky blíže optické osy. Důsledkem tohoto jevu je, že místo bodu tvoří obraz kruhová ploška. Tuto vadu je možné částečně eliminovat odcloněním okrajových paprsků, ale tím klesá intenzita. Jev je znázorněn na obr. 7.5. V tomto případě se ohnisková vzdálenost zjišťuje empiricky, v mém případě jsem po odzkoušení ponechal vzdálenost fotodiody od čočky na hodnotě 16,6 cm.



**Obr. 7.5:** Znázornění tvaru čočky a otvorová vada

## 7.6 Fotodetektor

Jako převodník dopadajících fotonů na elektrickou veličinu jsem použil fotodiodu označení BPW34 typu PIN. Její důležitou vlastností je velká aktivní plocha,

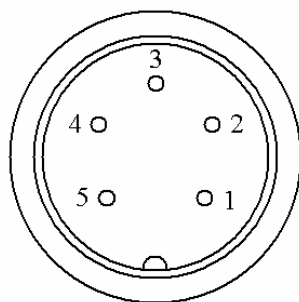
na kterou může dopadat záření, a to  $7,5 \text{ mm}^2$ . Tato vlastnost zcela eliminuje otvorovou vadu čočky. Také se lépe vyrovná přijímací hlavice s drobnými výchylkami své polohy, např. zaměřování nemusí být tak přesné. Větší plocha zapříčiňuje o něco vyšší kapacitu diody (pro závěrné napětí  $U_r = 3 \text{ V}$  je kapacita  $C_D = 25 \text{ pF}$ ). Kapacita sníží napěťový rozkmit přijímaného signálu, což ale vyrovná tvarovač před vstupem fázového komparátoru v obvodu PLL. Fotodioda pracuje pro viditelné a infračervené vlnové délky od 530 do 1050 nm. Pro vlnovou délku 635 nm vykazuje dioda zhruba 65 % citlivost při detekování světla oproti maximální dosažitelné citlivosti při 850 nm, která činí 0,6 A/W. Dioda má tak tendenci se přebudit intenzivním infračerveným zářením z např. žárovek nebo zářivek. Běžné denní světlo nebo umělé osvětlení správné funkci pojítka nevadí, problém nastává až při přímém slunečním nebo umělém světle dopadajícím na aktivní plochu. Dojde tak k přebuzení a potlačení užitečného signálu. Je nutné se vyhnout přímému dopadu paprsků na přijímací optiku i z důvodu možného zničení diody. Poloviční úhel dopadající světelného kužele může být až  $65^\circ$ , což je zcela dostatečné. Dále vykazuje poměrně slušné šumové vlastnosti, dostatečnou rychlost, nízkou úroveň parazitního proudu při naprosté tmě a malou cenu. Je možné na diodu připojit závěrné napětí až 32V a pracuje v podmínkách okolních teplot  $-40$  až  $100^\circ\text{C}$ . Nevýhodou ale zůstává méně příznivá spektrální citlivostní charakteristika. Při provozu tato skutečnost se ale nejeví závažná.

## 8 REALIZACE PROJEKTU

### 8.1 VÝROBA DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Při navrhování schématu optického vysílače a přijímače jsem zprvu využíval kontaktní nepájivé pole. Jakmile jsem na nepájivém poli odladil a vyzkoušel funkčnost zapojení, vytvořil jsem v programu Eagle předlohu pro výrobu desky plošných spojů. Navržená deska je i s rozměry uvedena v příloze B. Jedná se o výstup programu Eagle. V příloze je zobrazena deska ze strany spojů i součástek pro znázornění rozmístění součástek na desce. Elektrické obvody realizující schéma zapojení optického pojítka jsou zhotoveny na jednostranné cuprexitové desce plošných spojů. Deska má obecné rozměry 140 x 105 mm. Její atypický tvar je z důvodu přizpůsobení rozměrů desky parametrům krytu pojítka a z důvodu zajištění vzdálenosti fotodetektoru od přijímací čočky v její ohniskové vzdálenosti. Výřez směrem do desky je proveden z důvodu nezastínění přijímaného světelného kužele z čočky vlastní deskou, příp. součástkami na ni.

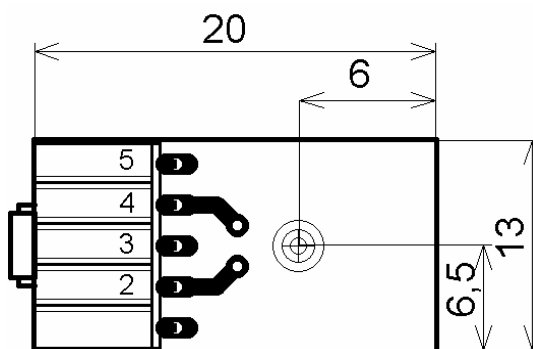
Pro potenciál země jsem použil rozlití mědi na desce z důvodu odstínění obvodů vysílače od přijímače a zjednodušení návrhu. Vývody připojené na zem jsou spojeny s rozlitou měděnou plochou zemního potenciálu přes termální můstky z důvodu odvodu tepla při pájení. Napájecí a signálové cesty jsou realizovány silnějšími spoji. Prvky obvodu představují diskrétní součástky. Soupis všech použitých součástek je uveden v příloze C. Přívod napájení do desky je prostřednictvím klasické svorkovnice. Stabilizátory napětí jsou vybaveny pro lepší odvod tepla malými hliníkovými chladiči. Audio vstupy a výstup se připojují k desce prostřednictvím konektorů typu Faston, které jsou pomocí pohyblivých vodičů rozebíratelně propojeny s hlavním konektorem pojítka. Výstupy anody a katody laserového modulu jsem spojil k desce odpojitelným dvoupinovým konektorem se zámkem. Každá hlavička optického pojítka je vybavena hlavním konektorem, na který se napojuje kabel obsahující žíly napájení, vstupních a výstupních audio signálů. Použitý konektor je mikrofonní typu XLR. Jedná se o robustní kovový šroubovací pětikolík, který je tak vhodný i pro venkovní použití a i případné větší namáhání. Na připojovaný kabel je nasazena zásuvka, aby byly ukryty piny určené pro napájení. Způsob zapojení jednotlivých pinů konektoru vidlice na straně hlavičky je uveden na obr. 8.1.



- 1 – mikrofonní audio vstup
- 2 – linkový audio vstup
- 3 – linkový audio výstup
- 4 – zem (GND)
- 5 – napájecí napětí +12V

**Obr. 8.1:** Zapojení hlavního přístupového konektoru pojítka (pohled zepředu)

Bylo potřeba zajistit správnou polohu fotodiody v ohnisku. Kvůli zajištění nezastínění a správné polohy jsem fotodiodu nasadil do dutinek klasické jednořadé dutinkové lišty s 90° zahnutými vývody. Tato lišta je napájena na malé desce plošných spojů. Lišta má pět pinů, dioda je zapojena do druhého (anoda) a čtvrtého (katoda). Deska sloužící jako držák této lišty, resp. fotodetektoru, je napevno připevněna nad hlavní deskou plošných spojů pomocí distančního sloupku délky 15 mm, který má na obou stranách vnitřní závity a je tak k oběma deskám přišroubován. Z malé desky jsou ještě vyvedeny pohyblivé izolované vodiče propojené s kontakty diody. Tyto vodiče jsou na druhé straně připájeny do hlavní velké desky plošných spojů. Zobrazení malé desky nesoucí fotodiodu je znázorněno na obr. 8.2.



**Obr. 8.2:** Nosná deska pro fotodiodu ze strany součástek

## 8.2 SESTAVENÍ MECHANICKÉ ČÁSTI POJÍTKA

Komunikace přes světelný paprsek probíhá mezi hlavicemi, které jsou vybaveny přijímací optikou, zdrojem světelného paprsku a elektronickými obvody. Jako konstrukční schránku pro tyto prvky jsem použil koupený kryt typu FS-1050P. Jedná se

o venkovní kamerový kryt určený pro montáž pod stříšku s krytím IP43. Tento kryt se ukázal jako velmi vhodný pro vlastní stavbu pojítka. Rozměry desky plošných spojů jsem upravil podle vnitřních rozměrů krytu. U krajních sloupků uvnitř krytu jsem zvětšil průměr vnitřního závitu, abych do nich umístil distanční sloupky výšky 10 mm pro uchycení desky plošných spojů. Předvrtaný otvor v zadní části na spodku krytu, který byl určený pro přivedení kabelu ke kameře, jsem využil pro našroubování hlavního XLR konektoru pojítka. Horní část krytu je odklopná a zajištěná šrouby. V případě potřeby se dá lehce odebrat. Přední část krytu je nasazená ve svých vodicích drážkách. Skládá se ze dvou částí, zadní s menším průměrem otvoru a přední s větším průměrem. Mezi těmito k sobě přišroubovanými částmi bylo původně tlusté sklo kruhového průměru. Místo něj jsem vložil gumové těsnění a zepředu jsem přilepil spojnou čočku. Použil jsem polymerové bílé lepidlo odolné povětrnostním vlivům a velkému rozsahu teplot. Střed čočky se nachází v polovině výšky krytu, kde k sobě přiléhají vrchní a spodní víko.

Laserový modul jsem nejprve umístil do kovové 8 mm objímky určené pro světelné diody. Zadní část modulu jsem obepnul smršťovací bužírkou pro vyplnění mezery mezi modulem a pouzdem objímky. Takto připravený modul jsem umístil do krabičky typu U-KM03. Objímku jsem nasadil do vyvrtané přední části krabičky. Na druhém okraji krabičky jsem vyříznul malý otvor pro odvod vývodních drátů laserového modulu. Ve spodní části krytu jsem na stejném místě provedl zářez pro uložení procházejících drátů směrem k obvodům vysílače. Krabička U-KM03 je dvoudílná, díly jsou spojeny dvěma malými šroubky. Na straně děr pro zašroubování jsem ve spodní části vyvrtal ještě jeden otvor o průměru 2 mm. Na boku kamerového krytu jsem v přední části vyvrtal dva otvory o průměru 2 mm. Těmito otvory jsem k sobě přišrouboval dvěma samořeznými šroubky krabičku nesoucí laserový modul a kamerový kryt. Díry jsem vyvrtal tak, aby byl laser ve vodorovné poloze ve výšce středu přijímací optiky. Jeden šroubek spojuje k sobě zároveň kryt, malou krabičku i obě části krabičky. Druhý šroubek jen krabičku s krytem. Poslední třetí šroubek standardně spojuje obě části U-KM03. Zde vzniká problém u duplexního provozu. Neměl jsem v domácích podmínkách možnost vytvořit toto spojení a umístění laserového modulu do objímky naprosto přesně. Navíc laserový modul nemusí vyzařovat souose se svým pouzdem. Proto se kalibrace provede až na místě instalace hlavic. Může se případně dodatečně upravit sklon připevněné krabičky U-KM03.

Kryt je poměrně prostorný, tudíž nebude vznikat problém s odvodem tepla ze součástek. Nevzniká na nich velký ztrátový výkon a stabilizátory jsou navíc samostatné pro vysílač a přijímač. Obě duplexní hlavice jsou zkonstruovány stejně a obvody mají stejné zapojení. Na vrchní straně krytu je ještě vyvýšená stříška, která lze v případě potřeby za docílení většího zastínění posunout dopředu nebo dozadu. Jen je nutné vyvrtat na určeném místě otvor pro spojovací šroubek. Kryt je konstrukčně navržen pro přichycení k držáku upevnitelného ke zdi. Opatřil jsem držák typu 31222, který je pro něj určený. Na závěr jsem kryt opatřil nálepkami upozorňujícími na používání laserového paprsku.

Výkresovou technickou dokumentaci ke konstrukci pojítka jsem vytvořil v programu Eagle. Neuváděl jsem kóty všech rozměrů, bylo by to zbytečné a nepřehledné. Jsou okótovány pouze důležité rozměry. Optické pojítko je zobrazeno v horním pohledu s odstraněným krytem, v předním pohledu s optikou a bočním pohledu na straně laserového modulu v příloze D. Rozměry objektů nakreslených v dokumentaci odpovídají skutečným rozměrům krytu pojítka. U pohledů je uvedeno měřítko zobrazení. V příloze E2 jsou zobrazeny některé fotografie hlavice optického pojítka. Na přiloženém datovém médiu je pak ještě přiložen dokument s popisem krytu od výrobce.

### 8.3 POČÁTEČNÍ NASTAVENÍ A ZAMĚŘENÍ

Připojením kabelu s konektorem XLR, který má piny zapojené tak, aby odpovídaly zapojení na obr. 8.1, dojde k zapnutí výrobku. Vypočtené hodnoty odporů trimrů (kap. 7.3) udávající maximální kmitočet obvodů HCF4046BE ( $R_8$ ,  $R_{29}$ ) a nastavení kmitočtu nosné ( $R_6$ ) jsem ještě přesněji donastavil pomocí multimetru. U vysílače se nejprve nastaví trimrem  $R_6$  nulové napětí a poté se pomocí  $R_8$  může nastavit hodnota maximálního kmitočtu.  $R_8$  je již nastaven. Následně ještě trimrem  $R_6$  se nastaví přesná hodnota středního kmitočtu  $f_0$ . Na vysílači je nutné, aby VCO kmital bez přivedeného vstupu na stejném kmitočtu  $f_0$  jako je střední kmitočet nosné vlny vysílače. Nastaví se tato hodnota přesně trimrem  $R_{29}$ . Hodnoty ostatních trimrů se nastaví až po zaměření. Zvláště velikost zesílení výstupního zesilovače je vhodné volit tak, aby nebyl na výstupu výrazný šum.

Zaměření je proces navázání spojení mezi vysílací a přijímací hlavicí. Jedná se o poměrně zdoluhavou a náročnou činnost vyžadující trpělivost a pečlivost. Především musí být zajištěna přímá viditelnost na přenosové trase mezi oběma účastníky přenosu. Zaměření se provádí v tomto případě vizuálně pohledem na přijímací protistranu. Je tak vhodné po dobu zaměření nastavit trimrem  $R_1$  nejvyšší jas laserové diody. Bude tak lépe pozorovatelný okem i na větší vzdálenost. Optika pojítka není vybavena antireflexní vrstvou, odraz světla je na ní teda okem patrný. Je vhodné použít i dalekohledu pro zjištění polohy světelné stopy na protější straně. Je velmi nutné dodržovat bezpečnostní zásady a nedívat se do zdroje laserového paprsku, zvláště s použitím dalekohledu je důležité manipulovat opatrně. Kryt pojítka se napevno přišroubuje k držáku, který se přišroubuje např. ke zdi. Nebo se zajistí stacionarita polohy hlavice jiným způsobem. Držák krytu umožňuje měnit nasměrování hlavice ve vertikální a horizontální ose. Postupujeme tak u zaměření manuálně a polehledem na protistranu. Je také na místě odebrat vrchní kryt pojítka, aby byla vidět již soustředěná světelná stopa na fotodetektoru. V případě nutnosti se povolí šroubky uchycující krabičku s laserem a změni se poloha podle situace. Jakmile je vidět dopad světla na fotodiody, dotáhnou se všechny šroubky a šrouby na držáku. Je nutné upevnit hlavicí pořádně, aby nedocházelo k samovolnému posunu polohy nebo chvění. Zde se velmi uplatní existence přijímací optiky, kdy nemusí být zaměření tak přesné a lépe se vyrovnává s malými pohyby hlavic. Světelný paprsek je už značně rozšířen, což zjednodušuje zaměření, ale také dochází ke ztracení optického výkonu. Po zafixování polohy nastavíme již poslechem nepřebuzenost fotodetektoru nastavením jasu laseru. Je potřeba nastavit úroveň tohoto napětí blízko hodnotě, kdy už dojde k přebuzení fotodiody. Jinak řečeno s větším jasnem bude přiváděno na laser větší napětí a amplitudy modulovaných impulzů budou větší. Tím se docílí snížení odstupů signálu od šumu. Dále nastavíme úroveň zesílení výstupního zesilovače pomocí  $R_{33}$  podle osobní potřeby, případně ještě zesílení mikrofonního zesilovače. Je vhodnější pro lepší SNR přivádět na vstup vyšší úroveň audio signálu, kdy se přenáší větší šířka pásma a výstup demodulačního signálu je větší. Po tomto nastavení již stačí nasadit horní kryt hlavice a upevnit ho šrouby. Zařízení je tak nastavené pro přenos zvuku.



## 9 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 9.1 Měření na vysílači

V kapitole 9 uvádím pro úplnost k některým naměřeným parametrům fotografie průběhů na obrazovce osciloskopu. Je to z důvodu autentičnosti zobrazení jednotlivých signálů, kdy by překreslením ztratily podrobnější grafický popis.

K měření parametrů uvedených v této kapitole jsem použil měřicí číslicové multimetry typu Range RE330F a M830B.

#### Spotřeba elektrického proudu

Celá hlavice zařízení (obvody vysílače i přijímače) má **proudový odběr** přibližně od 60 mA do 100 mA. Záleží přitom nejvíce na velikosti procházejícího proudu laserovým modulem a v menší míře také na zesílení u zesilovačů, stavu synchronizace PLL a připojení elektretového mikrofону. V běžném provozu je spotřeba kolem 80 mA. Při napětí 12 V tak činí **celkový příkon** zařízení 1,2 W, což představuje velmi nízkou hodnotu, také díky použití obvodů technologie CMOS.

#### Parametry mikrofonního předzesilovače

Ke zkreslení výstupního signálu začíná docházet zhruba při amplitudě  $U_{max} = 3,8 \text{ V}$  a  $U_{min} = -3,5 \text{ V}$ . Ideální hodnota je  $\pm 4,5 \text{ V}$ , protože je zaveden offset polovinou napájecího napětí 9 V z důvodu použití unipolárního napájení. Úbytek je způsoben výkonovými ztrátami operačních zesilovačů. Nesymetričnost zesílení horní a dolní amplitudy je způsobena nedokonalostí odporového děliče.

Při přivedení harmonického napětí o hodnotě  $U_{RMS} = 50 \text{ mV}$  má výstup velikost  $U_{RMS} = 2,5 \text{ V}$ . To je zesílení  $A_U = 50$ . Při tomto měření byl zpětnovazební odpor nastaven na  $R_{I8} = 5,9 \text{ k}\Omega$ . Podle teoretického výpočtu (vztah 7.3) by mělo být zesílení rovno  $A_U = 51,3$ . Dá se říci, že předzesilovač zesiluje podle teoretického předpokladu. Na výstupu není (kromě přebuzení) patrné žádné zkreslení, zákmity ani jiné deformace. Parametry předzesilovače jsou dány především vlastnostmi OZ NE5534.

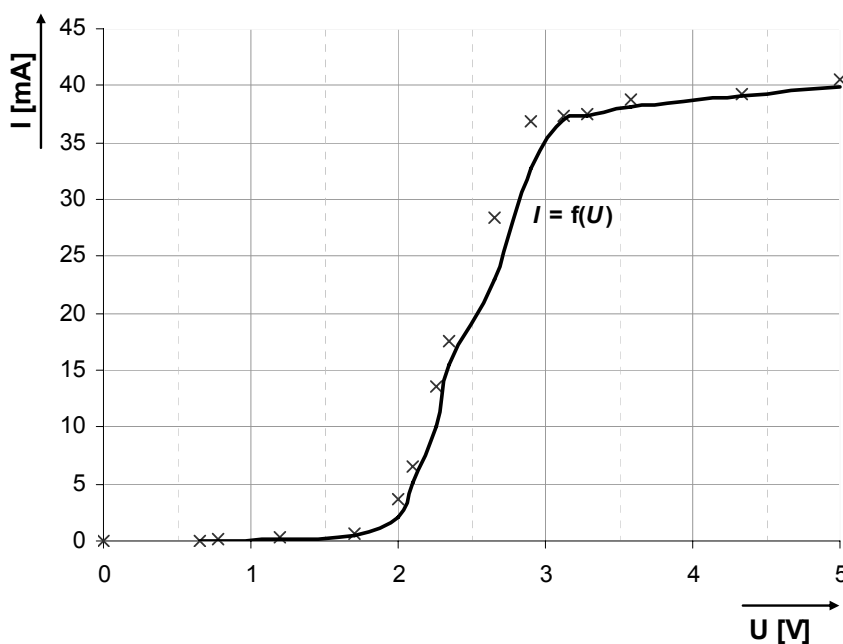
Napájení pro elektretový mikrofón přivedené na vstup bylo změřeno  $U_{bias} = 8,9 \text{ V}$ .

### Voltampérova charakteristika (VACH) laserového modulu

Tab. 9.1: VACH laserového modulu

|           |      |           |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_{AVG}$ | [V]  | 0         | 0,65  | 0,78  | 1,20  | 1,70  | 2,00  | 2,10  | 2,26  |
| $I_{AVG}$ | [mA] | 0         | 0,05  | 0,10  | 0,30  | 0,60  | 3,70  | 6,56  | 13,50 |
| $U_{AVG}$ | [V]  | 2,34      | 2,66  | 2,90  | 3,12  | 3,28  | 3,58  | 4,33  | 5,00  |
| $I_{AVG}$ | [mA] | 17,5<br>0 | 28,40 | 36,90 | 37,30 | 37,50 | 38,80 | 39,30 | 40,50 |

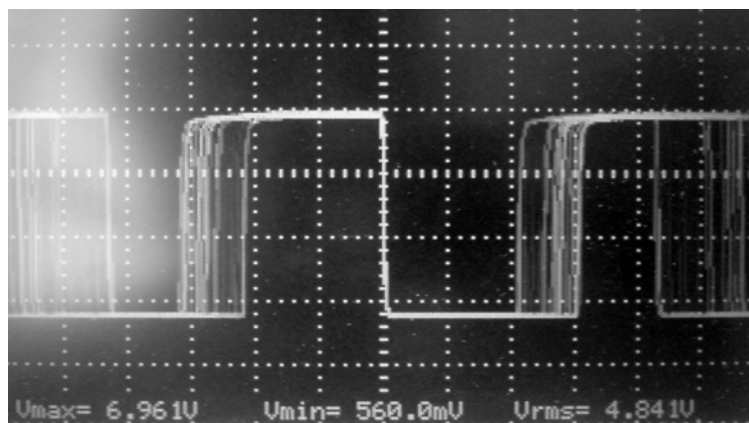
V tab. 9.1 jsou uvedeny hodnoty stejnosměrného proudu procházejícího modulem v závislosti na stejnosměrném napětí na jeho vývodech. Grafické znázornění této závislosti je na obr. 9.1. Mezi 2 až 3 V dochází k prudkému nárůstu procházejícího proudu. Je patrná funkce zabudované proudové ochrany v pouzdru modulu proti případnému tepelnému zničení. Od napětí 3 V roste procházející proud již velmi pozvolna. Nejvyšší povolený proud je 50 mA, tedy proudová ochrana je dostatečná. Proměnným odporem určeným pro regulaci jasu  $R_1$  lze nastavit největší stejnosměrnou hodnotu napětí na modulu  $U_{AVG} = 3,24$  V, který odpovídá největšímu stejnosměrnému proudu  $I_{AVG} = 37,5$  mA. Naměřené hodnoty příliš neodpovídají katalogové hodnotě diody, kde je uváděn pro napětí  $U_{AVG} = 3$  V proud  $I_{AVG} = 43$  mA.



Obr. 9.1: VACH laserového modulu

### Výstup napětím řízeného oscilátoru

Výstupní průběh VCO budící záření laseru a jeho kmitočtové rozmitání od středního kmitočtu  $f_0$  je patrné na obr. 9.2. Na linkovém vstupu vysílače je vstupní harmonický signál o úrovni 0 dB a kmitočtu 1 kHz.



$$U_{MAX} = 6,96 \text{ V}$$

$$U_{MIN} = 560 \text{ mV}$$

$$U_{RMS} = 4,84 \text{ V}$$

Měřítka os:

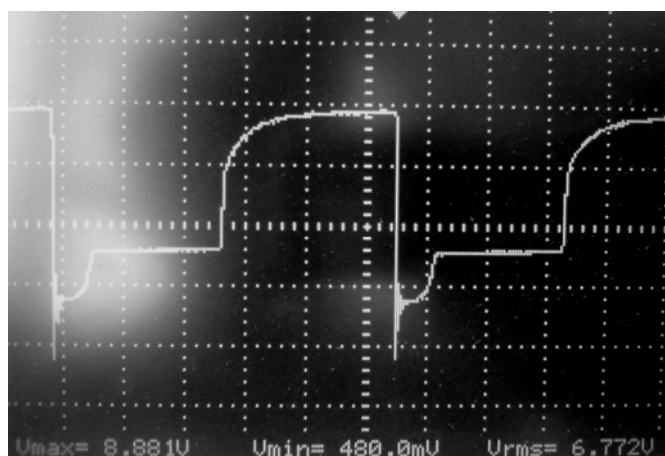
1d. => 2 V

1d. => 2  $\mu$ s

**Obr. 9.2:** Modulovaný signál VCO na vysílači

### Změřené napětí na laserovém modulu

Na obr. 9.3 je zobrazeno napětí na laserovém modulu. Rozmitaný signál je zastaven na jednom aktuálním průběhu. Platí také pro přivedené vst. napětí 0 dB a 1 kHz. Zaoblení nástupné hrany způsobuje filtrační kondenzátor  $C_6$ . Při ideálním buzení laseru by se úroveň napětí, resp. procházejícího proudu, na něm mělo pohybovat v rozmezí 10-90 % maximálního povoleného proudu. Moje řešení vzhledem k použitému zdroji laseru a typu přenášeného signálu se ale jeví jako dostatečné.



$$U_{MAX} = 8,88 \text{ V}$$

$$U_{MIN} = 480 \text{ mV}$$

$$U_{RMS} = 6,77 \text{ V}$$

Měřítka os:

1d. => 2 V

1d. => 2  $\mu$ s

**Obr. 9.3:** Modulovaný signál VCO na vysílači

## Převodní charakteristika VCO obvodu HCF4046BE

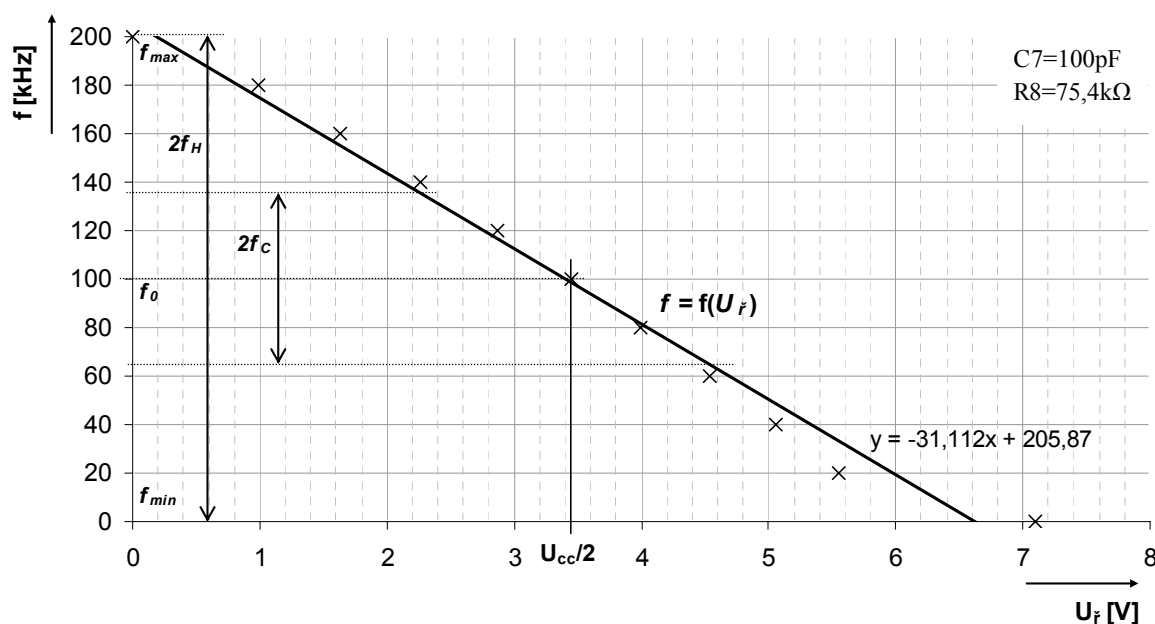
Tab. 9.2: Převodní charakteristika napětím řízeného oscilátoru obvodu 4046

|       |       |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $U_f$ | [V]   | 0   | 0,99 | 1,63 | 2,26 | 2,87 | 3,45 | 4,99 | 4,54 | 5,06 | 5,55 | 7,10 |
| $f$   | [kHz] | 200 | 180  | 160  | 140  | 120  | 100  | 80   | 60   | 40   | 20   | 0    |

Hodnoty výstupního kmitočtu VCO v závislosti na řídicím napětí  $u_f$  jsou uvedeny v tab. 9.2 a grafická reprezentace těchto dat na obr. 9.4. S rostoucí úrovní stejnosměrného napětí na řídicím vstupu generátoru klesá kmitočet jeho výstupních obdélníkových kmitů od 200 kHz do zhruba 1,5 Hz. Je zde patrná nelinearita obvodu. V grafu jsou vyznačeny pásma držení  $2f_H$  a zachycení  $2f_C$ . Převodní konstanta je rovna pro maximální kmitočet, potažmo pásmo držení, 200 kHz hodnotě přibližně  $k = -31$ . Záporné znaménko značí nepřímou úměrnost mezi těmito veličinami a je určena z rovnice lineární spojnice trendu programu Excel. Výstupní kmitočet VCO pak lze popsat rovnicí:

$$f = k \cdot U_f + f_{\max} = -31 \cdot U_f + 2 \cdot 10^5 \quad (9.1)$$

U přepočtu napětí na kmitočet nesmíme zapomenout přičíst maximální hodnotu napětí modulačního signálu k přibližně polovině napájecího napětí (3,45 V).



Obr. 9.4: Závislost výstupního kmitočtu generátoru na řídicím vstupu

## 9.2 Měření na přijímači

K měření parametrů uvedených v této kapitole jsem využíval funkční digitální generátor typu Agilent 33120A a digitální dvoukanálový osciloskop Agilent DSO3102A. Popis těchto přístrojů je přiložen na datovém médiu.

Měření parametrů samotného přenosu nízkofrekvenčního signálu jsem realizoval v prostorách uvnitř budovy na vzdálenost kolem 80 m. Pro podstatně jednodušší obsluhu jsem danou situaci řešil pomocí zrcadla pověšeného na stojanu na druhém konci chodby, na které jsem nasměroval laserový paprsek. Změnou polohy zrcadla jsem nasměroval paprsek na druhou hlavici, která byla umístěna poblíž hlavice vysílací. Měřil jsem komunikaci v jednom směru. Zaměření nebylo díky divergovanému paprsku a vzdálenosti pojitka od zrcadla 40 m příliš pracné. Stačilo pouhým okem nasměrovat paprsek směrem na přijímač, na kterém jsem provedl drobnější korekci polohy. Pro vlastní zaměření jsem zvýšil jas laseru, který jsem kvůli přebuzení detektoru po dokončení zaměření opět snížil. Přijímací optická spojná čočka i fotodioda plnily velmi dobře svou funkci, kdy stačil i jen zlomek světelné stopy dopadající bezprostředně na čočku. Optika vyrovnávala i slabší chvění zrcadla, pouze při velkém pohybu již docházelo k přerušování spojení. Komunikace probíhala při odstraněném horním krytu za běžného denního osvětlení.

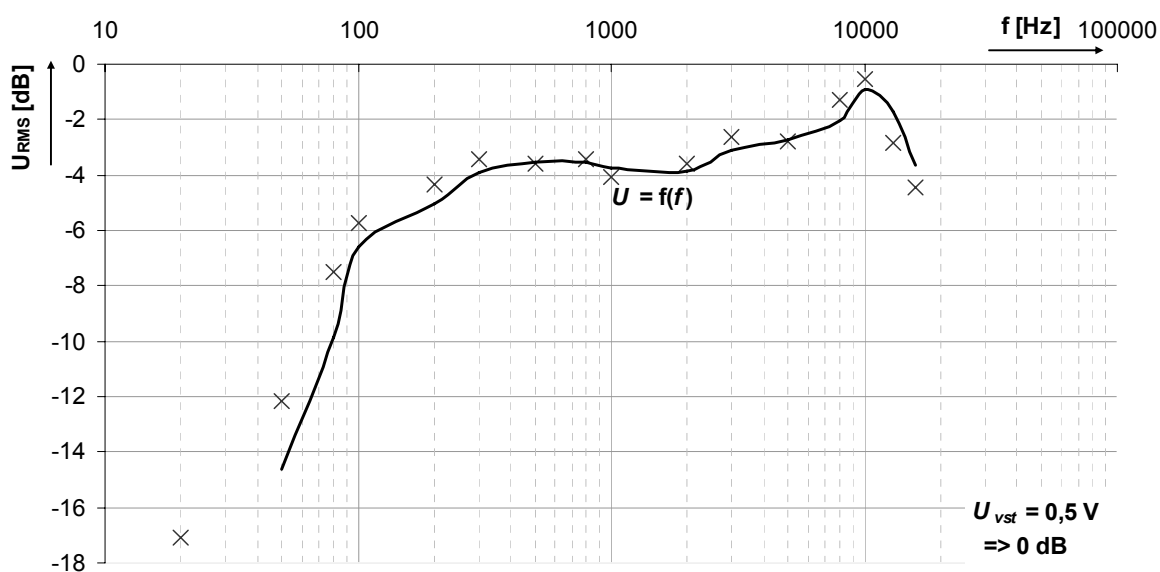
### Frekvenční přenosová charakteristika a vyhodnocení šumu

**Tab. 9.3:** Naměřené hodnoty převodní charakteristiky

$U_{RMS} = 500 \text{ mV}$  ; vzdálenost  $l = 80 \text{ m}$  ;  $I_{AVG, laseru} = 28 \text{ mA}$  ;  $f_0 = 100 \text{ kHz}$

| $f$       | [Hz]  | 20     | 50     | 80    | 100   | 200   | 300   | 500   | 800   |
|-----------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_{RMS}$ | [mV]  | 70     | 123    | 211,2 | 259,2 | 303,6 | 336   | 330   | 336   |
| $U_{RMS}$ | [dB]  | -17,08 | -12,18 | -7,49 | -5,71 | -4,33 | -3,45 | -3,61 | -3,45 |
| $f$       | [kHz] | 1      | 2      | 3     | 5     | 8     | 10    | 13    | 16    |
| $U_{RMS}$ | [mV]  | 312    | 330    | 369,6 | 362,4 | 432   | 470   | 360   | 300   |
| $U_{RMS}$ | [dB]  | -4,10  | -3,61  | -2,62 | -2,80 | -1,27 | -0,54 | -2,85 | -4,44 |

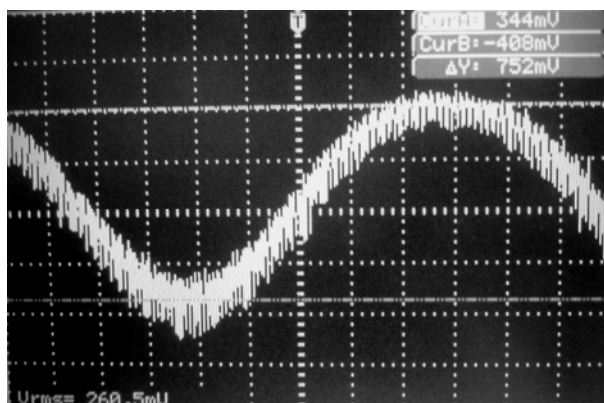
Při měření přenosové charakteristiky jsem na linkový modulační vstup vysílače připojil harmonický signál o efektivní hodnotě 500 mV. Kmitočet tohoto signálu jsem logaritmicky zvyšoval v rozsahu 20 Hz – 16 kHz a vyhodnocoval jej na přijímači. Potvrdilo se subjektivní vnímání potlačení nižších kmitočtů. Měření ukázalo nejvyšší přenos na 10 kHz, poté se začne zase snižovat. Trimr nastavující zesílení koncového zesilovače byl vytočen přibližně do 3/4 svého rozsahu. U grafu popisující frekvenční charakteristiku jsem použil poměrovou jednotku, kdy referenční hodnota je modulační napětí 500 mV. Kmitočet demodulačního signálu na přijímači odpovídal modulačnímu.



**Obr. 9.5:** Frekvenční přenosová charakteristika přenosové trasy

Na níže uvedených obrázcích jsou zobrazeny výstupy osciloskopu při měření přenosové charakteristiky. Na obr. 9.6 je znázorněn demodulovaný průběh kmitočtu 1 kHz. Je na něm patrný namodulovaný šum. Je zajímavé, že má kmitočet 100 kHz, tedy nosné, viz obr. 9.7. Vhodné by tak bylo umístit na výstup vhodnou vyhlazovací dolní propust.

V tab. 9.4 jsem uvedl naměřené špičkové hodnoty napětí šumu a užitečného signálu pro některé kmitočty. Jsou také uvedeny jednotlivé relativní poměry signál-šum v dB jednotkách.



$$U_{RMS} = 260 \text{ mV}$$

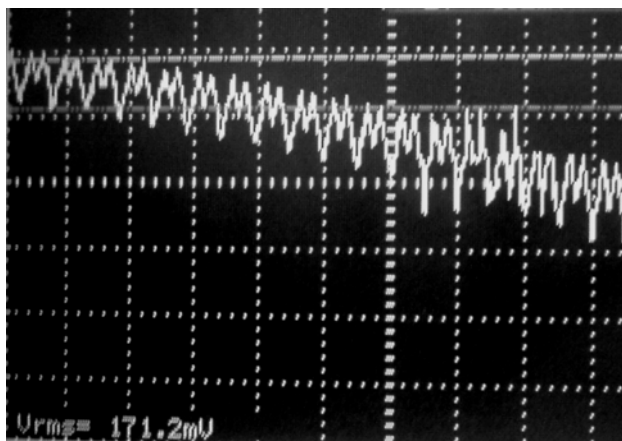
$$U_{P-P} = 752 \text{ mV}$$

Měřítka os:

1d. => 200 mV

1d. => 100  $\mu$ s

**Obr. 9.6:** Zobrazení demodulovaného průběhu  $f=1 \text{ kHz}$  na přijímači



$$U_{P-P, \text{šumu}} = 90 \text{ mV}$$

$$f_{\text{šumu}} = 100 \text{ kHz}$$

Měřítka os:

1d. => 200 mV

1d. => 20  $\mu$ s

**Obr. 9.7:** Detailní zobrazení namodulovaného šumu výst. průběhu ( $f=1 \text{ kHz}$ )

**Tab. 9.4:** Měření špičkového napětí šumu a užitečného signálu

| $f$                       | [Hz] | 20    | 50    | 1000  | 3000  | 8000  | 16000 |
|---------------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $U_{P-P, \text{signálu}}$ | [V]  | 0,174 | 0,348 | 0,882 | 1,046 | 1,221 | 0,848 |
| $U_{P-P, \text{šumu}}$    | [mV] | 80    | 77    | 76    | 77    | 86    | 84    |
| $SNR$                     | [dB] | 6,75  | 13,10 | 21,29 | 22,66 | 23,04 | 20,08 |

Vzhledem k potlačení nižších kmitočtů se více v tomto rozsahu uplatňuje šumová složka. Jinak se odstup signálu od šumu pohybuje přes **20 dB**, což je zhruba poměr 10. Tento šum může vznikat převážně na vysílaci použitím vlastního laserového modulu (proudové omezení) a ne úplně ideální modulací tohoto laseru.

Vliv na šum i na úroveň výstupu demodulátoru mělo také méně vhodné nastavení odporových trimrů udávající parametry FM modulátoru a demodulátoru. Jedná se tedy o maximální a střední kmitočet výstupu generátoru VCO. Po tomto měření jsem ještě provedl úpravu těchto hodnot, kdy se ještě zlepšili šumové vlastnosti. Při přerušení paprsku je na výstupu velmi malé napětí, což dokazuje správnou činnost smyčky PLL. Bohužel jsem již po konečném vylepšení zapojení (s výsledkem zlepšení šumových vlastností a většího přenosu) neměl možnost provést znovu zdlouhavé měření. Lze tedy předpokládat vyšší hodnoty SNR a celkového přenosu  $A_U$ .

U komunikace optického pojítka se mohla realizovat další spousta měření, např. simulování zhoršení podmínek přenosového prostředí, venkovní měření za ideálních i špatných podmínek počasí, přenos na větší vzdálenost, vyzkoušení dosahu aj. Více těchto měření jsem již z časových a technických důvodů při realizaci vlastního měření a kvůli rozsahu této problematiky nestihl provést. O vlivech ovlivňujících atmosférický přenos alespoň teoreticky pojednávají kapitoly 2 a 3. Pomocí jejich popisu lze provést alespoň teoretický rozbor při přenosu atmosférou, např. výkonová bilance spoje.

### Zhodnocení pomocí poslechu přijímaného audio signálu

Pro odzkoušení správné funkčnosti pojítka jsem také pochopitelně provedl snad nejdůležitější měření, a to na základě **subjektivního vnímání** při poslechu přenášené řeči nebo hudby. U tohoto způsobu měření se jevíly parametry přijatého signálu lépe než zobrazené a naměřené. Pocit při poslechu je velmi dobrý, nejsou slyšitelně výrazně potlačeny žádné kmitočty, ani nedochází k zřetelnému zkreslení, praskání, brumu apod. Přijatá hudba je na poslech snad o něco „plošší“ a postrádá výraznější basy a je patrně větší přenos u vyšších kmitočtů jak je patrné z obr. 9.5. Pokud na vstupu není vyloženě slabý signál, postačuje k dostatečně silnému výstupu malé zesílení na výstupním zesilovači a šum je díky tomu pro poslech **zanedbatelný**. Při běžném poslechu při správném nastavení parametrů součástek, podle kapitoly 8.3, není patrný. Na přiloženém datovém médiu jsou uloženy tři ukázky přenosu hudebního linkového monofonního (MP3) a mikrofonního (řečového) signálu na vzdálenost asi 5 m. Přenášel jsem opticky výstup ze zvukové karty počítače a také mikrofonu na přijímací hlavici pojítka. Z přijímací hlavičky jsem její zvukový výstup připojil na linkový vstup počítače a nahrál do formátu MP3. Měření na vzdálenost 80 m ukázalo, že kvalita přenášeného signálu je poslechem k nerozeznání od vzdálenosti řekněme oněch 5 m.



### Shrnutí parametrů optického pojítka

Pro přehlednost uvádím důležité vypočtené, změřené nebo určené parametry optického přenosu a samotného optického pojítka.

**Tab. 9.5:** Parametry optického pojítka

|                                | PARAMETR OZNAČENÍ/TYP                       | HODNOTA                           |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|
| <b>Signální vstupy/Výstupy</b> | Vstupy                                      | Linkový vstup<br>Mikrofonní vstup |
|                                | Výstupy                                     | Linkový výstup                    |
|                                | Hlavní konektor                             | XLR, 5pin., vidlice               |
| <b>Napájení</b>                | Napájecí napětí                             | Stejnoseměrné 12V                 |
|                                | Maximální proudový odběr                    | Stejnoseměrný 100 mA              |
|                                | Minimální proudový odběr                    | Stejnoseměrný 60 mA               |
|                                | Napájení mikrofону                          | Stejnoseměrné 8,9 V               |
| <b>Světelný zdroj</b>          | Laserový modul                              | ML-SHW-635-05-D                   |
|                                | Maximální napětí / proud v zapojení pojítka | 3,24 V / 37,5 mA                  |
|                                | Výkon                                       | 5 mW                              |
|                                | Vlnová délka                                | 635 nm                            |
|                                | Třída                                       | III a)                            |
|                                | Životnost                                   | 3000                              |
| <b>Fotodetektor</b>            | Druh  | PIN                               |
|                                | Typ   | BPW34                             |
|                                | Velikost aktivní plochy                     | 7,5 mm <sup>2</sup>               |
| <b>Optická čočka</b>           | Typ   | Spojná, konkávkonoexní            |
|                                | Průměr                                      | 65 mm                             |
|                                | Ohnisková vzdálenost                        | 166 mm                            |
| <b>FM modulátor</b>            | Realizující obvod                           | HCF4046BE                         |
|                                | Střední kmitočet                            | 100 kHz                           |
|                                | Minimální/maximální kmitočet                | 0 Hz / 200 kHz                    |
|                                | Převodní konstanta VCO                      | -31                               |

**Tab. 9.5:** Parametry optického pojítka (pokračování)

|                       |   |                           |
|-----------------------|---|---------------------------|
| <b>FM demodulátor</b> | Realizující obvod                         | HCF4046BE                 |
|                       | Pásmo zachycení                           | 35 kHz                    |
|                       | Pásmo držení                              | 200 kHz                   |
| <b>FM modulace</b>    | Modulační zdvih                           | 35 kHz                    |
|                       | Šířka pásma                               | 102 kHz                   |
|                       | Modulační index                           | 2,2                       |
| <b>Šum</b>            | Přibližný průměrný odstup signálu od šumu | -22 dB                    |
| <b>Kryt</b>           | Typ                                       | FS-1050P                  |
|                       | Celkové rozměry                           | 298x100x112 mm<br>(d,š,v) |
|                       | Krytí proti povětrnostním podmínkám       | IP 43                     |

## 10 ZÁVĚR

V mé diplomové práci na téma optické pojítka jsem se zabýval především jeho návrhem a samotnou praktickou realizací. Optické pojítka by se dalo popsat jako zařízení, které tvoří optoelektronický vysílač a přijímač zajišťující přenos a příjem zvuku, videa nebo dat pomocí světelného toku procházejícího nemetalickým atmosférickým prostředím. Mým úkolem bylo vytvořit koncepci řešení akustického pojítka, tedy umožnit vysílání a přijímání akustického elektrického signálu prostřednictvím optického světelného paprsku na vzdálenost cca 200 m. Přenášený signál je tak nízkofrekvenční, reprezentující zvuk v kmitočtovém pásmu 20 až 15 kHz. Požadavkem bylo umožnit duplexní provoz.

Nejdříve jsem se seznámil s problematikou optických bezkabelových spojů. Také jsem popsal přenosové prostředí a fyzikální podstatu samotného světelného paprsku. Dále jsem rozebral jednotlivá přenosová média a zhodnotil jsem jejich výhody a nevýhody při přenosu. V dalším postupu jsem vybral vhodné řešení aplikace pojítka pro parametry zadání. Použil jsem tak přenos informace prostřednictvím laserového paprsku, který generoval laserový modul, integrující v sobě optiku rozšiřující světelný svazek, řídicí ochranný obvod a samotnou laserovou diodu. Na straně příjemce je využíván pro zpětný převod laserového přenosového paprsku na elektrický signál fotodioda typu PIN. A jako modulaci nosné světelné vlny jsem použil modulaci frekvenční, která je realizována napětově řízeným generátorem a celkovým obvodem smyčky fázového závěsu. Pro tuto funkci jsem vybral obvod CMOS typu HCF4046BE.

Při vlastním návrhu jsem vycházel z teorie optických spojů, elektrických obvodů a inspiroval jsem se ze schémat zapojení uvedených v seznamu použitých zdrojů. Pracoval jsem také empiricky s použitím kontaktního nepájivého pole. Musel jsem vyřešit především návrh zapojení a jeho realizaci prostřednictvím desky plošných spojů. Další problematický úkol představovalo zkonstruování mechanické části celého zařízení. Ztíženo to bylo ještě o požadavek umístění pojítka ve venkovním prostředí. Vyřešil jsem tento požadavek použitím venkovního krytu, určeného původně pro bezpečnostní kameru. Jedná se o hotový výrobek, který jsem upravil pro své potřeby. Tento kryt zajišťuje zakrytí a upevnění desky plošných spojů, uchycení laserového modulu, vstupního konektoru a uchycení přijímací optické čočky. Také ve spojení

s držákem umožňuje nasměrování při zaměření a ukotvení polohy hlavic pojítka. Kryt se ukázal jako velmi vhodná volba. Jedná se i o poměrně originální a vhodné řešení, osobně jsem zatím na stejné nenarazil. Nebylo také snadné obstarat vhodnou a cenově dostupnou čočku. Nakonec jsem obstaral spojnou konkávkonoconvexní čočku, která vykazuje dobré vlastnosti. U duplexního provozu ale vzniká problém nepřesného zaměření obou hlavic současně na sebe. Proto se nastavení polohy laserového modulu pro zajištění duplexu provede až na konkrétní aplikaci. Návrh, stavba a způsob zaměřování jsou popsány v kapitolách 7 a 8. Vše jsem musel vyrobit dvakrát kvůli duplexní komunikaci.

Po zkonstruování jsem provedl měření některých vybraných parametrů, které uvádím v kapitole 9. Měření jsem uskutečnil na vzdálenosti 80 m. Obecně se jedná u tohoto akustického pojítka o poměrně jednoduché a levné řešení vykazující minimálně dostačující parametry. Je tak i méně náchylné na případné poruchy. Při vlastním poslechu přijímaného audio signálu je subjektivně posouzená kvalita na dobré úrovni. Prostřednictvím optického přenosu se dá bez problému komunikovat mezi účastníky přenosu přes mikrofón, přenášet hudbu nebo oboje současně. Dobře popisuje přenos kmitočtová přenosová charakteristika (obr. 9.5). Dochází na přijímači k potlačení nižších kmitočtů, celkovému mírnému zeslabení oproti vstupu a přenos je zatížen větším šumem. Přibližná hodnota odstupe signálu od šumu je přes 20 dB. Pokud se přivede na vstup signál vhodné úrovně a zesilovač na výstupu se tak nebude muset příliš vybudit, šum se částečně eliminuje. V případě většího zesílení bohužel vzroste i slyšitelný šum. Pro vyhlazení demodulovaného průběhu by bylo záhodno zařadit vhodnou dolní propust. Velikost amplitudy vstupního signálu je pro kmitočtový rozsah pásma zachycení  $\pm 0,8$  V. Tato hodnota je pro audio přenos a použitou FM modulaci dostatečná. V případě potřeby lze jednoduše zvýšit pásmo zachycení úpravou dolní propusti u PLL. Použití FM modulace eliminuje rušivé vlivy při šíření paprsku. U demulace je podstatný kmitočet, nikoliv amplituda, což představuje v této komunikaci velkou výhodu. Šířka přenášeného pásma je přibližně  $B = 102$  kHz a modulační index  $\beta = 2,2$ .

Nejpodstatnější je, že přenášený zvukový signál je posluchačem dobře vnímán a zařízení funguje podle pokynů v zadání. Je možné ho na menší vzdálenosti poměrně lehce zaměřit. Nevykazuje však špičkovou kvalitu, ale ani se to nevyžadovalo. Naměřené a vypočtené parametry jsou uvedeny v kapitole 9, kde jsou i souhrnně uvedeny v tab. 9.5. Na přiloženém datovém médiu jsou uloženy ukázky tří vybraných

skladeb ve formátu MP3 a pořízené záznamy těchto ukázek z přijímače optického pojítka.

Kromě výše uvedených vylepšení by bylo vhodné v případných budoucích úpravách lépe nastavit úroveň napěťového průběhu, budícího laserový modul. Teď může docházet k chirpu a prodlevám při buzení laseru, kap. 5.2.3 a 9.1. Pro kvalitnější přenos by také bylo vhodnější používat jako zdroj laserového paprsku samotnou diodu s navrženým driverem. Také pokud by pojítko bylo vystaveno teplotám pod 0°C, musely by se vyměnit některé integrované obvody za stejný druh, jen jiného typového označení pracující při větším rozsahu teplot..

U realizace stavby mě provázely typické problémy týkající se špatných kontaktů a vypadnutých vodičů. Delší dobu jsem nastavoval parametry obvodu 4046 přijímače a vysílače. Také menší problémy představovala dostupnost některých komponentů. U mechanické části je problém s přesným nastavením souosého vyzařování diody pro zajištění duplexu. U elektrotechnických obvodů jsem se delší dobu potýkal s potlačením šumu a rušivých signálů, což se mi částečně zdařilo.

Pro návrh desek plošných spojů a zhotovení technické dokumentace jsem použil program Eagle a pro některá zobrazení program ProfiCAD.

Výsledkem práce je mnou navržený, zkonstruovaný funkční výrobek. Umožňuje komunikovat pomocí laserového paprsku bezkabelovým spojem. Úspěšně jsem provedl navázání komunikace a měření na vzdálenost 80 m. Subjektivní poslech byl na danou vzdálenost stejný jako na několik málo metrů. Na optickém výkonu laseru byla ještě dostatečná rezerva, tudíž zařízení bude schopno komunikovat i na 200 m. Přínosem práce je, že vznikl výrobek se zajímavým využitím a s příznivými parametry. Využití je např. u funkce „světelného telefonu“, kdy mohou účastníci komunikovat bez natažení kabelů. Optické bezkabelové spoje pracují v bezlicenčním pásmu. Zároveň si mohou mezi sebou navzájem posílat hudební signál. Podmínkou je přímá viditelnost mezi komunikujícími stranami.

## 11 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] WILFERT, O. Fotonika a optické komunikace. Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno.
- [2] JOHNSON, D. A. Handbook of Optical Through the Air Communication. Kniha v pdf formátu, [online]. Dostupné z:  
<<http://www.imagineeringezine.com/files/air-bk2.html>>
- [3] SALEH, B. E. A., TEICH, M. C. Základy fotoniky 3. Nakladatelství Matfyzpress, Praha 1995. ISBN 80-85863-00-6.
- [4] WILFERT, O. Modelování atmosférických optických spojů, Současný stav, trendy vývoje a výuka. Nakladatelství Vutium, Brno 2007, ISBN 978-80-214-3395-3.
- [5] LUKÁŠ, M. Laserové diody, část 1-4. Internetový časopis [online]. Dostupné z:  
<[www.elektrorevue.cz](http://www.elektrorevue.cz)>.
- [6] BOHÁČ, L. Optické komunikační systémy. Prezentace 3. přednášky, ČVUT Praha, Fakulta elektrotechniky.
- [7] VRBA, R., LEGÁT, P., FUJCIK, L., HÁZE, J., KUČHTA, R., MIKEL, B., SKOČDOPOLE, M. Digitální obvody a mikroprocesory. Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno 2003.
- [8] Carter, M. LEDs vs. Laser Diodes for Wireless Optical Communication, CTO, ClearMesh Networks, December 2006, [online]. Dostupné z:  
<[www.clearmesh.com/downloads/wp\\_led\\_0407.pdf](http://www.clearmesh.com/downloads/wp_led_0407.pdf)>.
- [9] Krejčí R., Hulicius E. Polovodičové lasery a LED-ky. Internetový článek [online]. Dostupné z: <<http://www.microdesignum.cz>>.

- [10] HALLIDAY, D., RESNICK R., WALKER, J. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky, Část 4. Nakladatelství Vutium, Brno 2000, ISBN 80-214-1868-0.
- [11] Libra M., Štěrbá J., Bláhová I. Fyzikální podstata světla. Internetový časopis [online]. Dostupné z: <[www.odbornecasopisy.cz](http://www.odbornecasopisy.cz)>.
- [12] SCHOMMERS, A. Elektronika tajemství zbavená. Kniha 4: Pokusy s optoelektronikou . Nakladatelství HELL, Ostrava 2002, 192 stran, ISBN 80-86167-04-6.
- [13] KULHAVÝ, K. Bezvláknová optika 1-5. Internetový článek [online]. Dostupné z: <<http://www.root.cz>>.
- [14] KA7OEI's optical communications. [online]. Dostupné z: <<http://www.modulatedlight.org/>>.
- [15] Projekt Ronja. [online]. Dostupné z: <<http://ronja.twibright.com>>.
- [16] ČÍŽ, R. Teorie sdělování. Prezentace 4. přednášky. FEKT VUT, Brno.
- [17] Svačina, J. Speciální elektronické součástky a její aplikace. Učební elektronické texty FEKT VUT, Brno 2004.
- [18] Malý kurs fyziky. [online]. Dostupné z: <<http://www.gymkrom.cz/optika/index.html>>.
- [19] Jeryho web. Pro bastlíře. [online]. Dostupné z: <<http://volny.cz/cb16/bast.htm>>.
- [20] SLÁNSKÝ, M. Jednoduchý kvalitní zesilovač pro sluchátka. Internetový článek [online]. Dostupné z: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1803-Jednoduchy-kvalitni-zesilovac-pro-sluchatka.html>>.
- [21] Amatérské rádio. Časopis pro praktickou elektrotechniku. Ročník 1994, číslo 11, nakladatelství Magnet-press, Praha 1994.

## PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

## Seznam použitých veličin a symbolů

|                  |                       |  |
|------------------|-----------------------|--|
| $A$              | [-]                   | absolutní koeficient zesílení                                |
| $a$              | [-]                   | relativní koeficient zesílení                                |
| $\alpha_{I,AP}$  | [-]                   | koeficient útlumu  |
| $\alpha$         | [km <sup>-1</sup> ]   | koeficient extinkce  |
| $\alpha_{fluct}$ | [-]                   | koeficient útlumu vzniklý fluktuací                          |
| $\alpha_{turb}$  | [-]                   | koeficient útlumu vzniklý turbulencí atmosféry               |
| $\alpha_{12}$    | [-]                   | koeficient útlumu šířením                                    |
| $B$              | [Hz]                  | šířka pásma  |
| $\beta$          | [-]                   | modulační koeficient   |
| $c$              | [km.s <sup>-1</sup> ] | rychlost světla  |
| $C$              | [F]                   | el. kapacita   |
| $f$              | [Hz]                  | kmitočet   |
| $f_0$            | [Hz]                  | střední kmitočet   |
| $f_{max}$        | [Hz]                  | maximální kmitočet   |
| $f_{min}$        | [Hz]                  | minimální kmitočet   |
| $f_C$            | [Hz]                  | pásmo zachycení  |
| $f_H$            | [Hz]                  | pásmo držení   |
| $I$              | [A]                   | proud  |
| $I_{AVG}$        | [A]                   | střední hodnota proudu                                       |
| $I_{RMS}$        | [A]                   | efektivní hodnota proudu                                     |
| $M$              | [dB]                  | linková rezerva  |
| $\pi$            | [-]                   | Ludolfovo číslo (3,14...)                                    |
| $R$              | [Ω]                   | el. odpor  |
| $SNR$            | [-]                   | poměr signálu ku šumu  |
| $U$              | [V]                   | napětí   |
| $U_{RMS}$        | [V]                   | efektivní napětí   |
| $\omega$         | [-]                   | úhlová rychlost, kmitočet, imaginární část komplex. proměnné |



## **Seznam použitých zkratk**

|        |   |
|--------|---|
| AM     | Amplitudová modulace                                      |
| AOS    | Atmosférický optický spoj                                 |
| APD    | Lavinová fotodioda  |
| DBFL   | Laser s rozloženou zpětnou vazbou                         |
| VCSEL  | Laser plošně vyzařující                                   |
| DHL    | Laser s dvojitou heterostrukturou                         |
| DP     | Dolní propust   |
| EX-OR  | Exkluzivní součet-hradlo                                  |
| FM     | Frekvenční modulace                                       |
| FSO    | Optický spoj (Free space optical link)                    |
| IR     | Infračervený  |
| LED    | Světelná dioda (Light Emitting Diode)                     |
| LD     | Laserová dioda (Laser diode)                              |
| MOSFET | Tranzistory řízené polem                                  |
| nf     | Nízkofrekvenční   |
| OZ     | Operační zesilovač  |
| PIN    | Typ fotodiody   |
| PLL    | Smyčka fázového závěsu (Phase lock loop)                  |
| PM     | Fázová modulace   |
| POS    | Přijímací optická soustava                                |
| VACH   | Volt-ampérova charakteristika                             |
| VCO    | Napětově řízený oscilátor (Voltage controlled oscillator) |

## **SEZNAM PŘÍLOH**

### **A SCHÉMA ZAPOJENÍ OPTICKÉHO POJÍTKA**

A.1 Schéma zapojení vysílače

A.2 Schéma zapojení přijímače

### **B DOKUMENTACE K DESCE PLOŠNÝCH SPOJŮ**

B.1 Strana spojů

B.2 Strana součástek

### **C SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK**

### **D TECHNICKÁ DOKUMENTACE KONSTRUKCE**

D.1 Horní pohled

D.2 Boční pohled

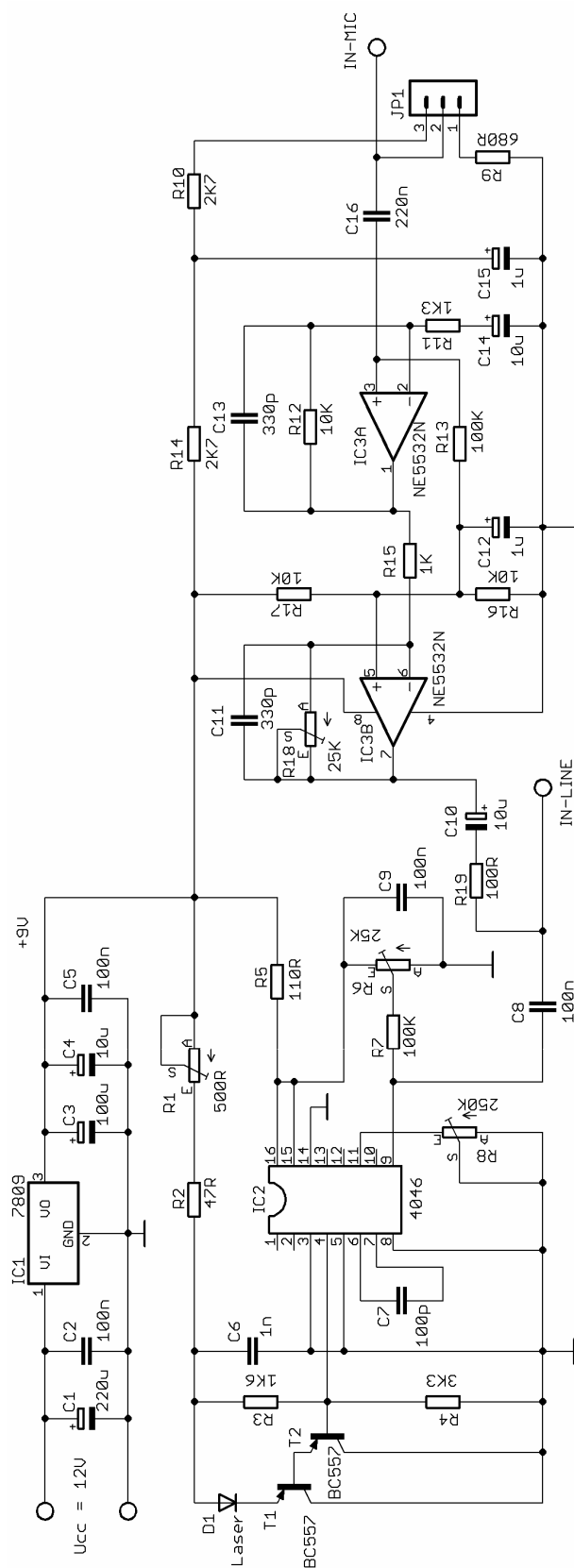
D.3 Přední pohled

### **E FOTODOKUMENTACE**

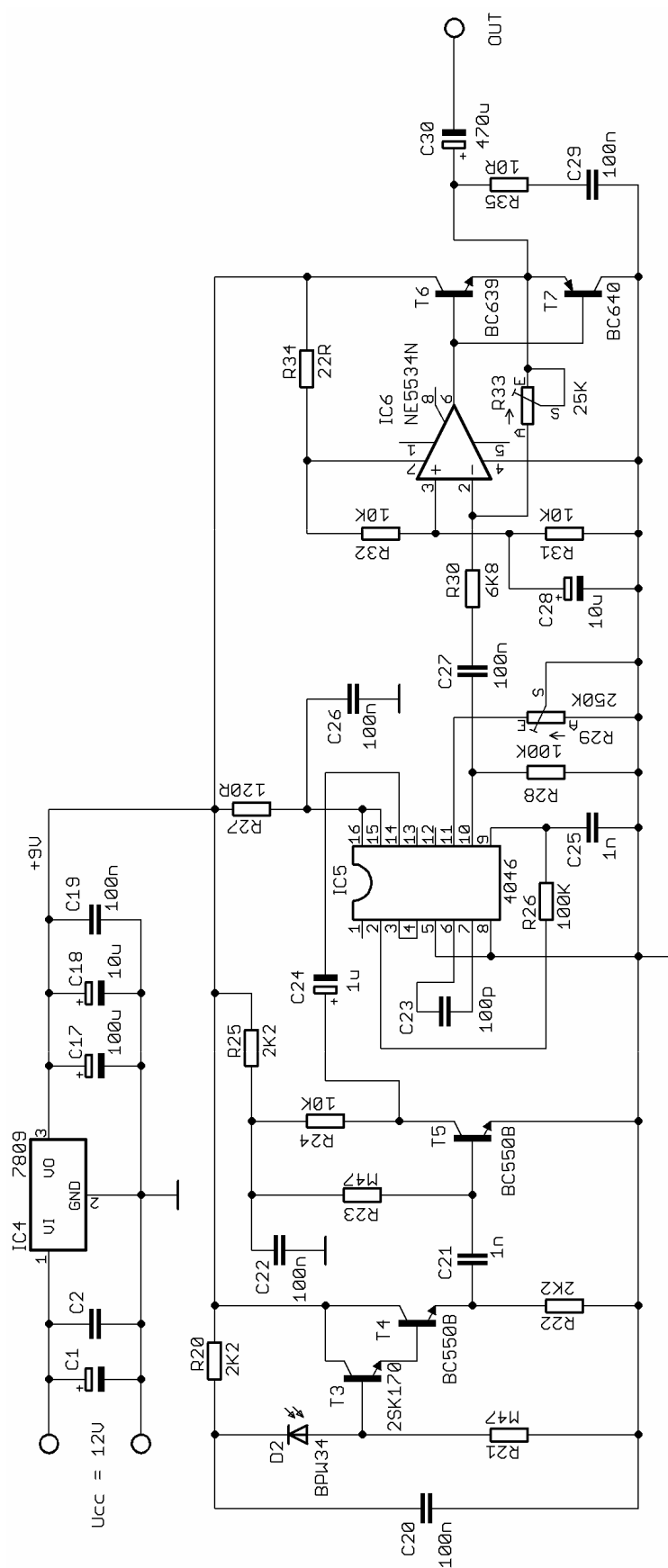
### **F OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA**

## A SCHÉMA ZAPOJENÍ OPTICKÉHO POJÍTKA

### A.1 Schéma zapojení vysílače

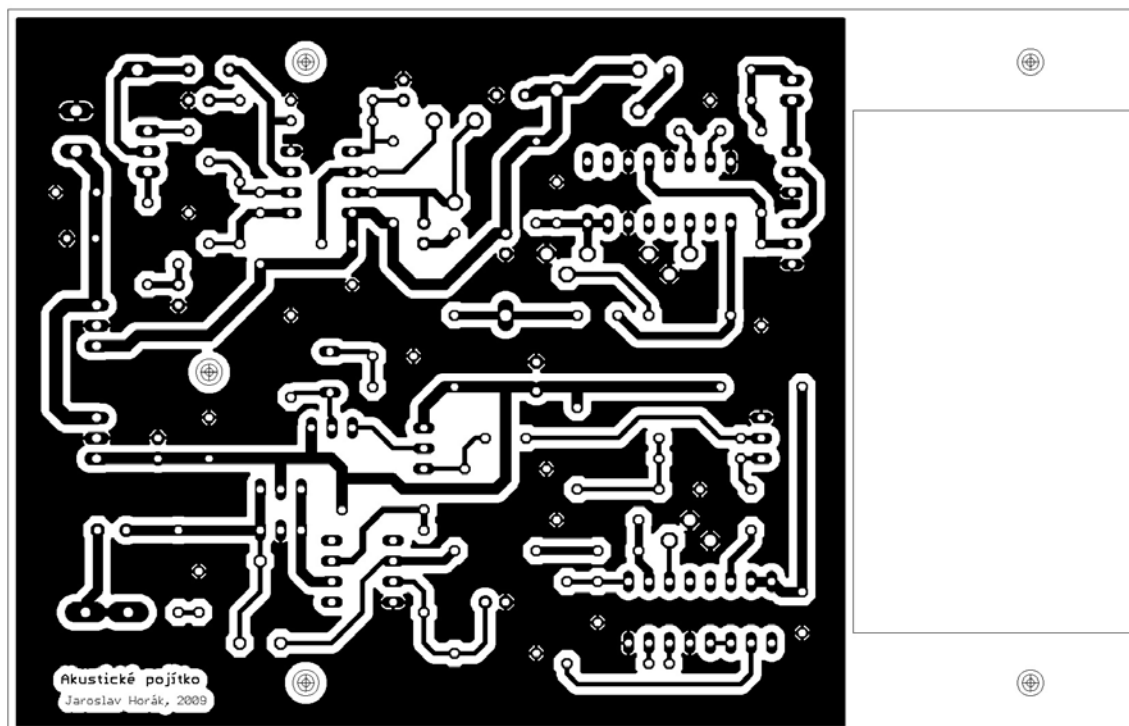


## A.2 Schéma zapojení přijímače

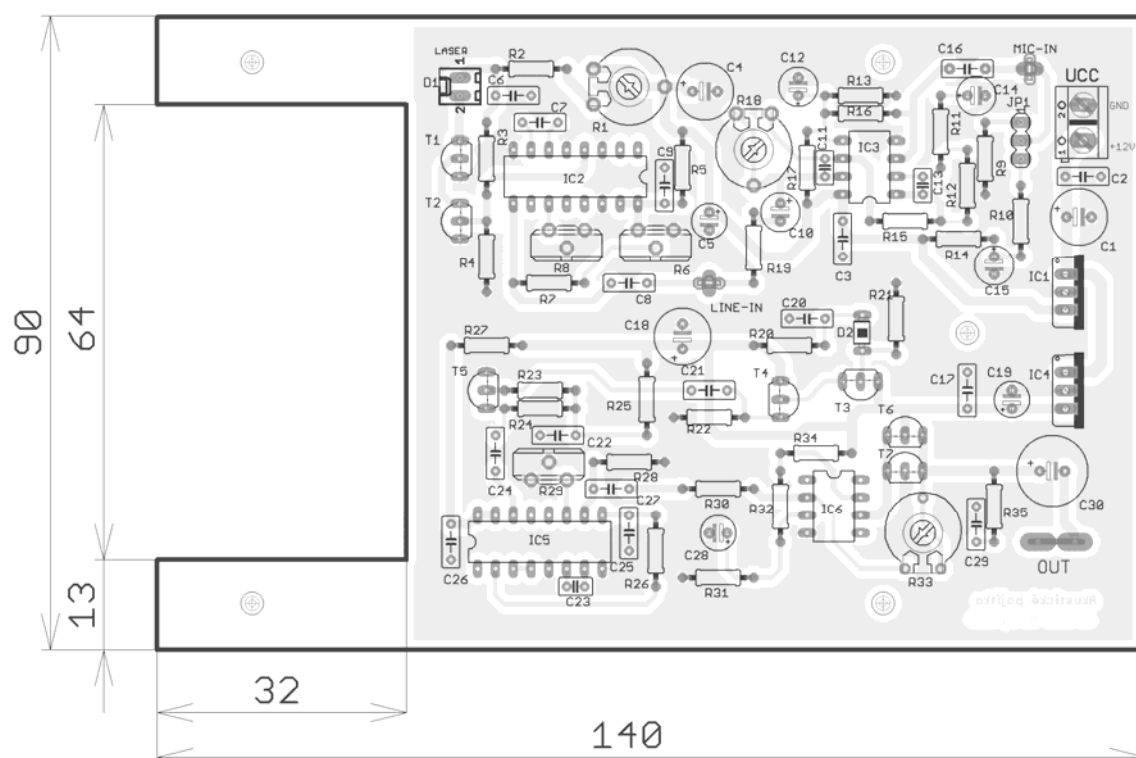


## B DOKUMENTACE K DESCE PLOŠNÝCH SPOJŮ

### B.1 Strana spojů



### B.2 Strana součástek



## C SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

| REZISTORY PEVNÉ                 |         |       |       |
|---------------------------------|---------|-------|-------|
| Reference                       | Hodnota | Počet |       |
| R2                              | 47R     | 1     |       |
| R3                              | 1k6     | 1     |       |
| R4                              | 3k3     | 1     |       |
| R5                              | 110R    | 1     |       |
| R7, R13, R26, R28               | 100k    | 4     |       |
| R9                              | 680R    | 1     |       |
| R10, R14                        | 2k7     | 2     |       |
| R11                             | 1k3     | 1     |       |
| R12, R16, R17, R24,<br>R31, R32 | 10k     | 6     |       |
| R15                             | 1k      | 1     |       |
| R19                             | 100R    | 1     |       |
| R20, R22, R25                   | 2k2     | 3     |       |
| R21, R23                        | 470k    | 2     |       |
| R27                             | 120R    | 1     |       |
| R28                             | 100k    | 1     |       |
| R30                             | 6k8     | 1     |       |
| R34                             | 22R     | 1     |       |
| R35                             | 10R     | 1     |       |
| REZISTORY PROMĚNNÉ              |         |       |       |
| Reference                       | Hodnota | Typ   | Počet |
| R1                              | 500R    | PT15V | 1     |
| R6                              | 25k     | PT6H  | 1     |
| R8                              | 250k    | PT15H | 1     |
| R18, R33                        | 25k     | PT15V | 2     |
| R29                             | 250k    | PT6H  | 1     |

| KONDENZÁTORY KERAMICKÉ                             |         |       |
|--|---------|-------|
| Reference  | Hodnota | Počet |
| C2, C5, C8, C9, C19,<br>C20, C22, C26, C27,<br>C29 | 100n    | 10    |
| C6, C21, C25                                       | 1n      | 3     |
| C7, C23  | 100p    | 2     |
| C11, C13   | 330p    | 2     |
| C16  | 220n    | 1     |
| KONDENZÁTORY ELEKTROLYTICKÉ                        |         |       |
| Reference  | Hodnota | Počet |
| C1   | 220u    | 1     |
| C3, C17  | 100u    | 2     |
| C4, C10, C14, C18, C28                             | 10u     | 5     |
| C12, C15   | 1u      | 2     |
| C30  | 470u    | 1     |
| KONDENZÁTORY ELEKTROLYTICKÉ                        |         |       |
| Reference  | Hodnota | Počet |
| C24  | 1u      | 1     |

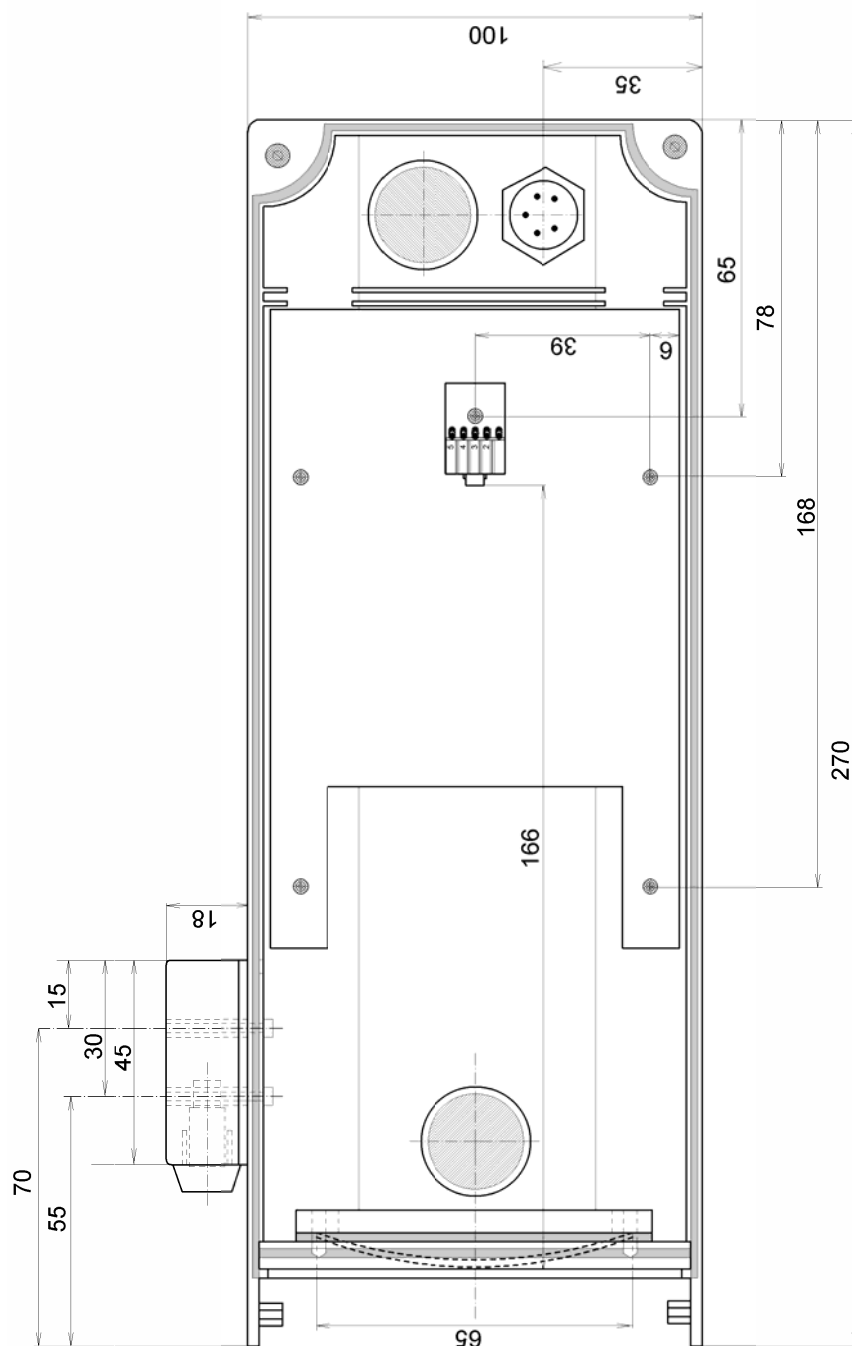
| OSTATNÍ SOUČÁSTKY |                 |                          |       |
|-------------------|-----------------|--------------------------|-------|
| Reference         | Hodnota         | Poznámka                 | Počet |
| D1                | Laserový modul  | 5 mW, 635 nm             | 1     |
| D2                | BPW34           | Fotodioda PIN            | 1     |
| IC1, IC4          | L7809           | Stabilizátor             | 2     |
| IC2, IC5          | HCF4046BE       | PLL                      | 2     |
| IC3               | NE5532          | OZ                       | 1     |
| IC6               | NE5534          | OZ                       | 1     |
| JP1               | jumper          | Propojka                 | 1     |
| T1, T2            | BC557           | Bipolární                | 2     |
| T3                | 2SK170          | N-FET                    | 1     |
| T4, T5            | BC550B          | Bipolární                | 2     |
| T6                | BC639           | Bipolární                | 1     |
| T7                | BC640           | Bipolární                | 1     |
|                   | DO1A            | chladič                  | 2     |
|                   | S1G20           | Kolíky-lišta 20pin       | 1     |
|                   | JUMP_BL         | Jumper                   | 1     |
|                   | LS1560          | Faston vidlice           | 1     |
|                   | FH48x05         | Faston zásuvka           | 1     |
|                   | LST1315         | Faston vidlice           | 2     |
|                   | FH28x05         | Faston zásuvka           | 2     |
|                   | SKM3x6          | šroub                    | 8     |
|                   | SKM3k           | matice                   | 2     |
|                   | SKM3UK          | podložka                 | 4     |
|                   | ARK500/2B       | svorkovnice              | 2     |
|                   | SOKL16          | patice                   | 2     |
|                   | SOKL8           | patice                   | 2     |
|                   | MIC335          | XLR,vidlice na panel     | 1     |
|                   | MIC325          | XLR,na kabel,zasuvka     | 1     |
|                   | DA5M3x10        | Dist.sloupek 10mm        | 4     |
|                   | DI5M3x15        | Dist.sloupek 15mm        | 1     |
|                   | L-REFLEK. 8MM/M | Objímka LED8mm,chrom     | 1     |
|                   | krabíčka        | U-KM03                   | 1     |
|                   | Kryt kamerový   | FS-1050P                 | 1     |
|                   | Držák krytu     | 31222                    | 1     |
|                   | Optická čočka   | 65mm prumer, f = 16,6 cm | 1     |

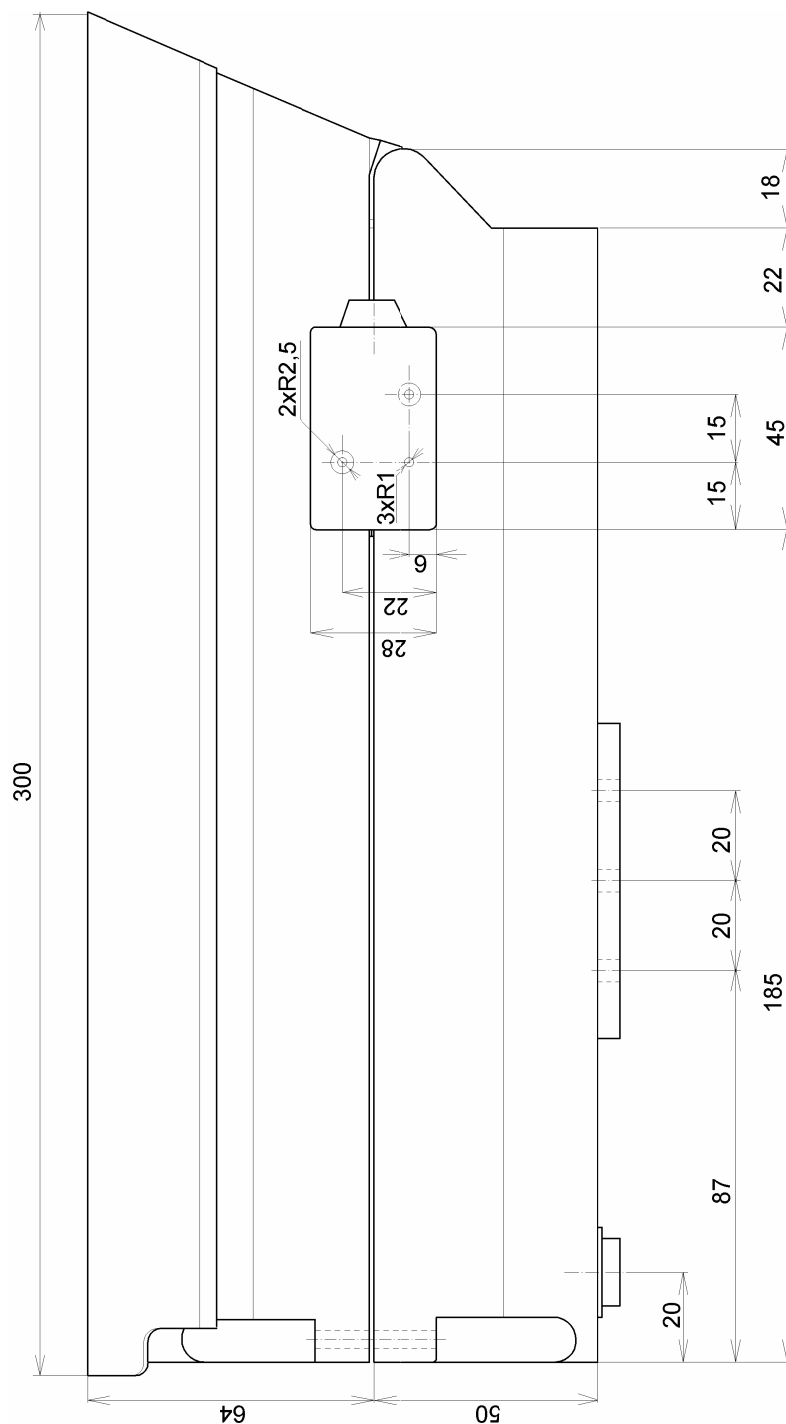


## D TECHNICKÁ DOKUMENTACE KONSTRUKCE

### D.1 Horní pohled (bez vrchního krytu)

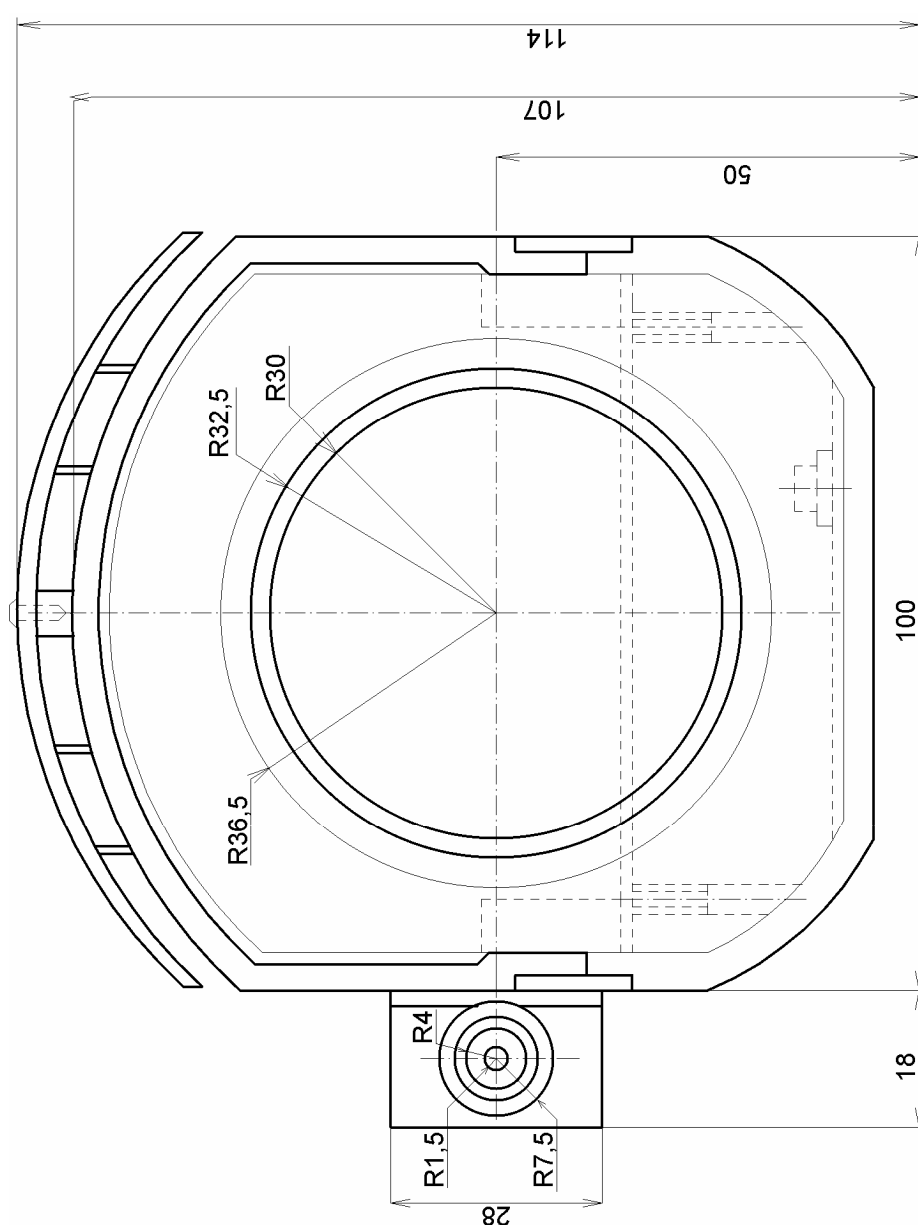
Měřítko 3:5



**D.2 Boční pohled ze strany umístění laserového modulu****Měřítko 3:5**

### D.3 Přední pohled ze strany optické spojné čočky

Měřítko 1:1

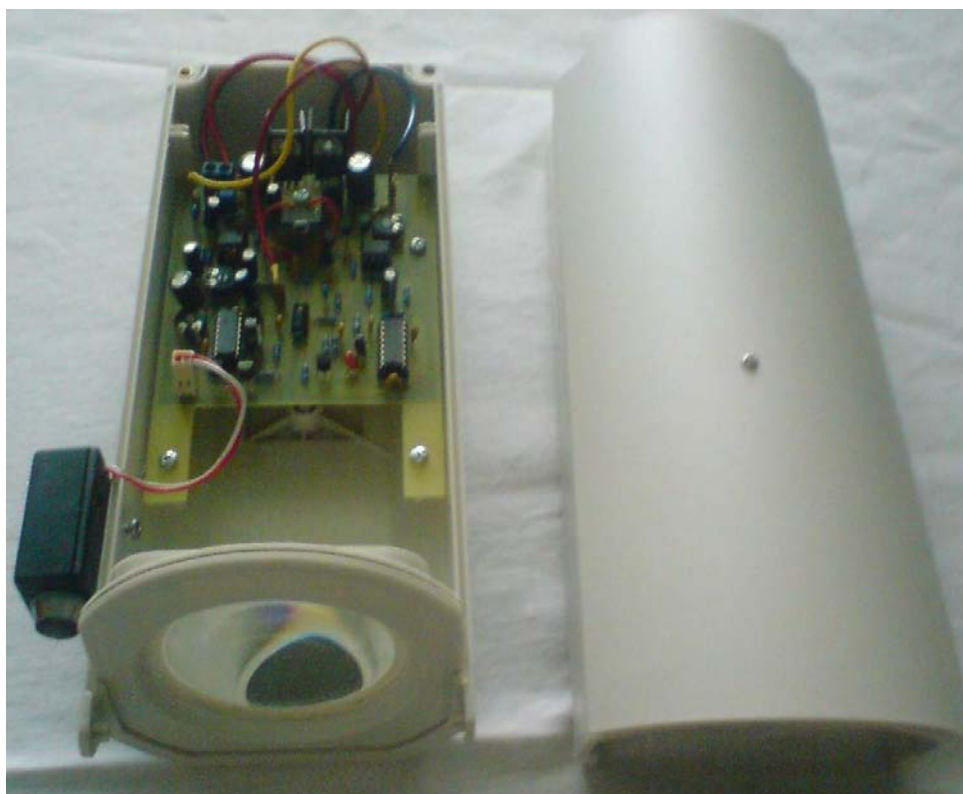


## **E FOTODOKUMENTACE**

### **E.1 Pohled na zakrytovanou hlavici optického pojítka**



### **E.2 Pohled na zakrytovanou hlavici optického pojítka**



## **F OBSAH PŘILOŽENÉHO MÉDIA**

**F.1 Vlastní diplomová práce ve formátu pdf**

**F.2 Soubory ukázek skladeb (MP3) + nahrané po přenosu (MP3)**

**F.3 Technická dokumentace**

**F.4 Technické popisy integrovaných obvodů, součástek a krytu  
(Datasheety)**

**F.5 Fotodokumentace**